

フレッチング疲労の研究 : 変動引張荷重を受ける鋼について

著者	礒谷 潔
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	1982
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000861/

修 士 論 文

題 目 フレッシング疲労の研究
- 変動引張荷重を受ける鋼について -

指導教授 佐 藤 準一 教授

商船学研究科 機関学専攻

昭和 56 年入学

氏 名 磯 谷 潔

昭和 58 年 1 月 31 日提出

目 次

1章	緒 論	1
2章	フレッチング疲労に関する従来の研究	
2-1	フレッチング疲労に影響をおよぼす諸因子の影響	6
2-2	フレッチング疲労防止法	19
3章	電気めっきとその影響	23
4章	フレッチング条件下で接触面に作用する応力	34
5章	実験装置と実験方法	50
6章	結果と考察	
6-1	摩擦力・すべり振幅の波形	61
6-2	摩擦係数とすべり振幅の変化	65
6-3	摩擦係数とすべり振幅	70
6-4	接触部の損傷状況	73
6-5	繰返し速度の影響	76
6-6	き裂の発生と進行	79
6-7	フレッチング疲労曲線	84
6-8	形状効果	90
6-9	めっきの影響	92

6-10 めっき材の摩擦係数とすべり振幅の変化 -- 105

6-11 めっき皮膜の損傷 - - - - - 108

6-12 各種銅めっきの影響 - - - - - 110

6-13 ニ層めっき - - - - - 115

7章 結 論 - - - - - 122

あとがき - - - - - 125

文 献 - - - - - 127

1 章 緒 論

機械要素の結合部や接触部に微小な接線方向の振動が与えられると表面損傷を生じる。

これをフレッチング損傷という。

このときの相対すべり振幅は接触部の形状や接触荷重によって異なるが、数 μm ～数十 μm の微小量でも損傷が起こることがあり、発生した摩耗粉が接触面間に介在すること、相対すべり速度が小さいために液体潤滑膜の生成が困難なこと等が特徴として知られている。

フレッチングが実際に見られるのは、次のような場合である。(表 1 参照)

- (1) 自在継手やころがり軸受、往復運動をするカムなどのような微小な往復運動をする機械要素。
- (2) ボルトやリベットなどで結合された機械部品、圧入された軸とボス、ワイヤなど繰返し荷重を受けて変形し、その結合部が部材の剛性の差により相対すべりを生ずるとき。

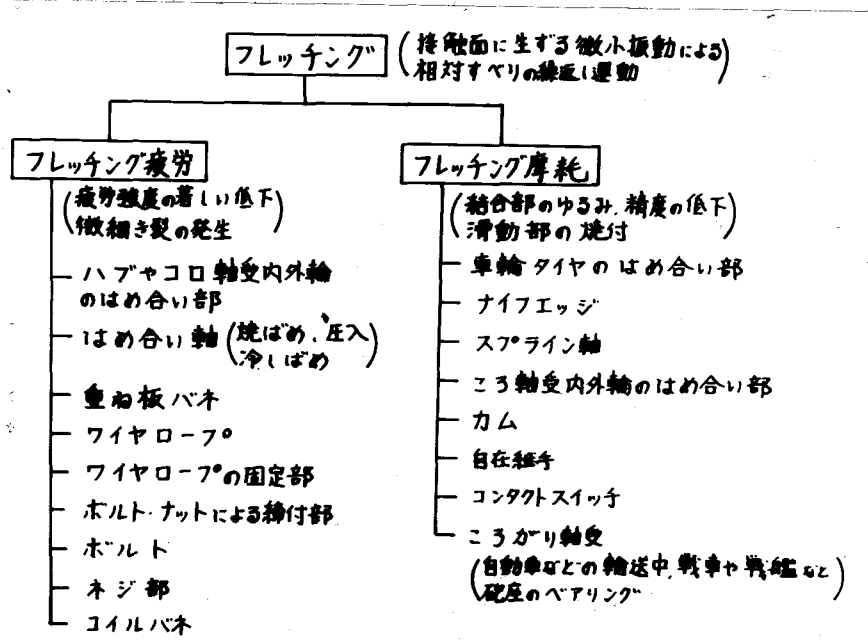
上記(1)の場合は、機械の精度や機能を低下させ、特に摩耗量が問題となるので「フレッチング摩耗」という。図 1-1 にボールベアリングの

＊
損傷例を示す。

上記(2)の場合には、フレッチングによりき裂が発生して疲労寿命を著しく低下させるのでフレッチング疲労と呼ばれる。このときの疲労強度は平滑材の大気中の疲労強度の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 、あるいはそれ以上にも低下するといわれている。図1-2^{*}は、船用ディーゼル機関(発電機用)のクランクピンボルトがフレッチング疲労により破損したものである。

なお、フレッチング摩耗とフレッチング疲労との間には直接的な関係がある場合とない場合とがあり、状況を十分把握して解析し、対策を講ずるのが肝要である。

表1 フレッチング疲労とフレッチング摩耗の実例¹⁾



フレッチング疲労のメカニズムについては、接触面圧、摩擦力、すべり振幅、材質、雰囲気などの影響因子に主点を置いた多くの研究があるが不明な点も多く残されている。また、従来曲げ応力またはねじり応力に関するものが多く研究されており、変動引張応力に関するものは極めて少ない。

フレッチング疲労防止方法として、従来から潤滑油の使用、挿入板、機械的表面処理（ショットピーニング、ロールピーニング）、滲炭、窒化、焼入れ、金属めっき、溶射、イオンプレーティングなどの方法が研究されているが、それらの結果は試験条件、繰返し応力の状態、材質などにより異なるため一般的な見解は得られていない。

本研究では、上記(2)の損傷(図1-2)との関連から、鋼のフレッチング疲労の基礎的知見を得るために、まず試験装置を作成し、現象の把握に主点を置いた。ついで防止法の一つとして金属めっきを考え、その効果について調べた。

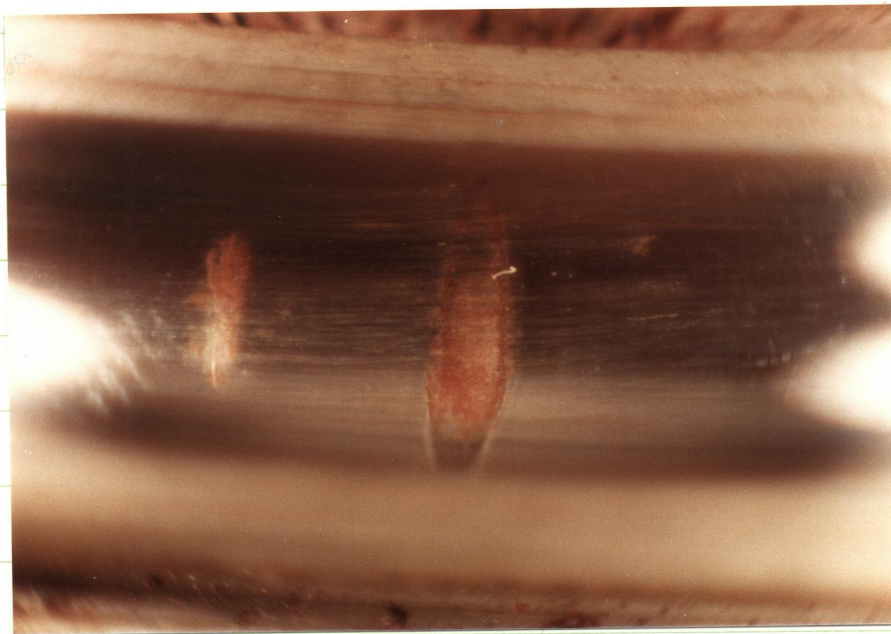
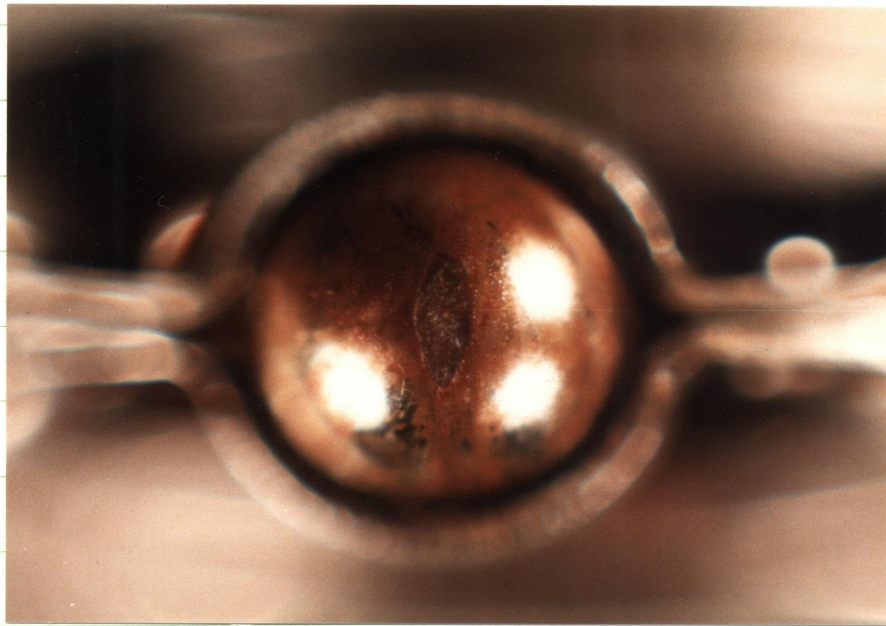


図 1-1 ボールベアリングのフレッチング損傷*

* 佐藤：未発表。

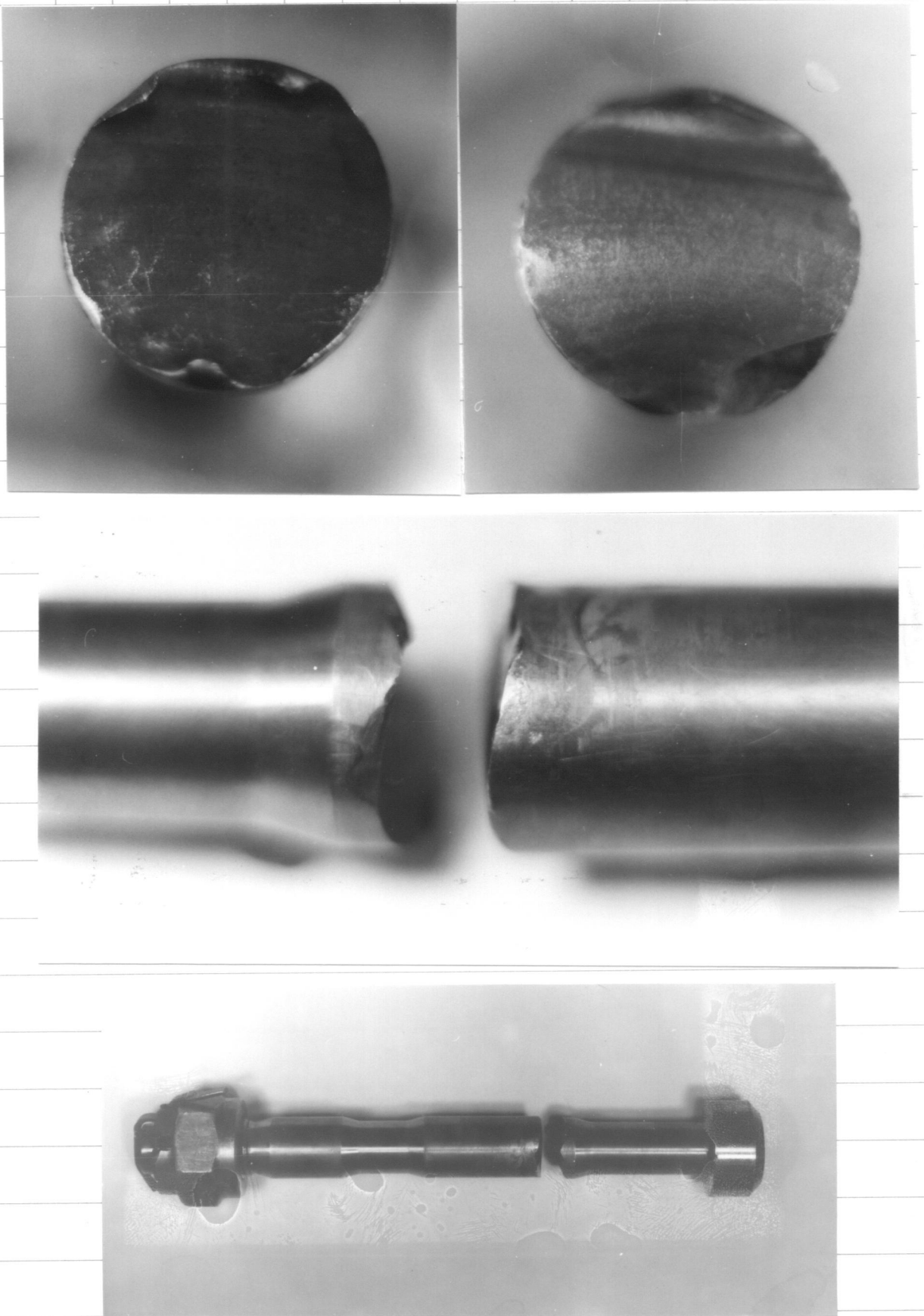


図 1-2 フレッチング疲労により破損したディーゼル機関のクランクピンボルト*

*佐藤準一：未発表

2 章 フレッチング疲労に関する従来の研究

2-1 フレッチング疲労に影響をおよぼす諸因子の影響

フレッチング疲労は、接触面の相対すべりに起因するものであり、疲労強度に影響をおよぼす諸因子としては、相対すべり量、接触面圧、繰返し速度など機械的な因子と、接触面の状態(潤滑・表面あらさ)、材質さらに雰囲気などの化学的な因子がある。これらの中には、相互関係のあるものもあり 単独の影響については解明されていないものもあるが、今までの研究によれば 次のようなことが報告されている。

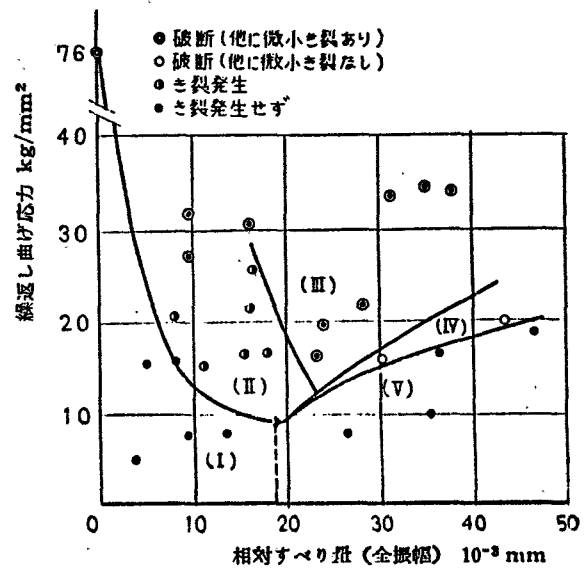
① 相対すべり量の影響

フレッチング疲労の相対すべりは、駆動力(繰返し応力)による弾性変形の結果として生じるものが多い。この場合は、駆動力が大きくなるにつれて相対すべり量も増加する。

相対すべり量を制御し、その影響のみを調べた研究は少ないが、西岡・平川²⁾らはカムとリンク装置を用いてすべり量を一定に制御しフレッチング疲労試験を行なった。

その結果は、図 2-1 でフレッチング疲労強さは、

相対すべりの影響
を大きく受けて、
すべり量が大きくなる
につれて低下するが、
その値が約 $20\mu m$
付近で最低となり
それ以上では再び
高くなる。



き裂の発生応力 図 2-1 フレッチング疲れ強さに与える相対
すべり量の影響 2)

増加するに従って低下し、 $15 \sim 20\mu m$ で最低となる。

さらにすべり量が大きくなると、微細なき裂が
摩滅することにより き裂発生応力が上昇する。

また、すべり量が微小の時には フレッチング疲労
強さは かなり高い。

他にも 相対すべり量に関する研究は、Fenner
と Field, Field と Waterhouse³⁾ らのものがある。
それによれば、相対すべり量が 疲労限 に与える
影響は、平均応力と関連しており、平均応力が零
のときは、フレッチング疲労限は 相対すべり量の
増加とともに低下するか $8\mu m$ 以上になると
一定となる。 引張平均応力 が加わると
最も有害な相対すべり量は $9 \sim 14\mu m$ で、このとき
平均応力が増加するにつれて 疲労強さは急激な

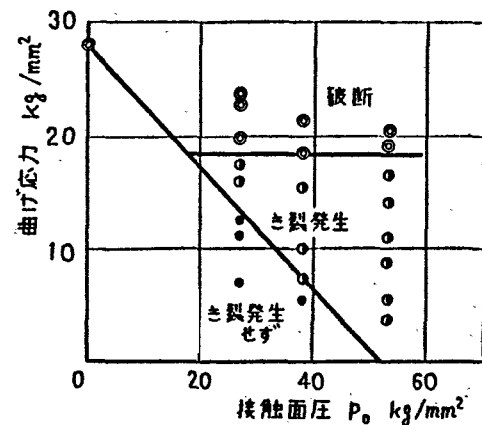
低下を示すといわれている。

② 接触面圧の影響

相対すべり量が制御されていない状態では、一般に接触面圧が高くなるにつれて相対すべり量は小さくなる。

西岡・平川⁴⁾らは、炭素鋼の繰返し曲げ試験において、ハットの曲率半径を変えることにより接触面圧を変化させてその影響を調べた。

その結果は、図2-2で
き裂の発生応力は、
面圧 P_0 が大きくなるにつれて直線的に低下するが、破断に関する疲れ強さは、 $P_0 = 20 \text{ kg/mm}^2$ 程度以上ではほぼ



一定となる。 図2-2 フレッチング疲労強さに及ぼす

また、種々の材料の平板 接触面圧の影響⁴⁾

と円筒とを接触させた

結果⁵⁾によれば、接触圧力が増加すると疲労強度の急激な低下が見られるが、接触圧力が 70 MN/m^2 以上では疲労強度は一定となるという。

③ 平均応力の影響

フレッチングをひき起す繰返し応力には、平均応力を伴う場合が多い。また、疲労強度を向上させるためのショットヒーニング、表面圧延、熱処理などによる圧縮残留応力が存在することもあり、この場合も平均応力として作用する。

炭素鋼(S35C)の焼ならし材を用いた繰返し曲げ試験の結果によれば、

図2-3 平均応力 零

図2-4 引張平均応力

図2-5 圧縮平均応力

のようになる。

以上より 引張平均応力が存在すると破断に関する疲れ強さはかなり低下し、

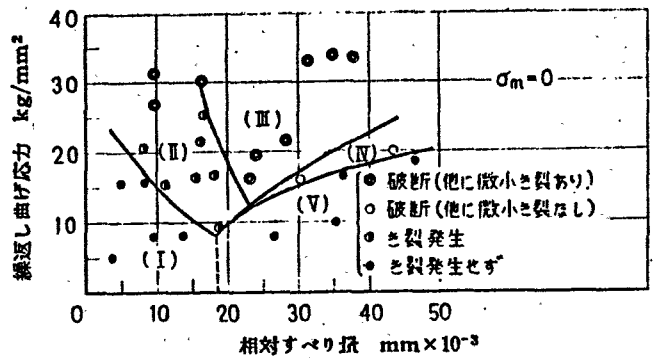


図2-3 平均応力零の場合⁶⁾

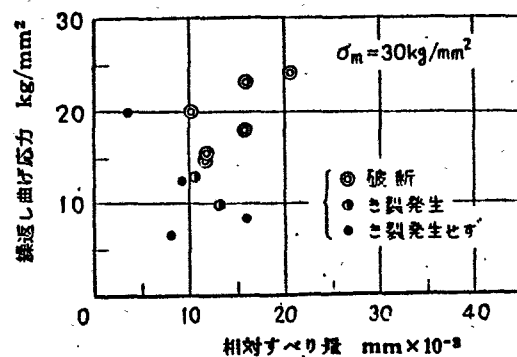


図2-4 引張平均応力の場合⁶⁾

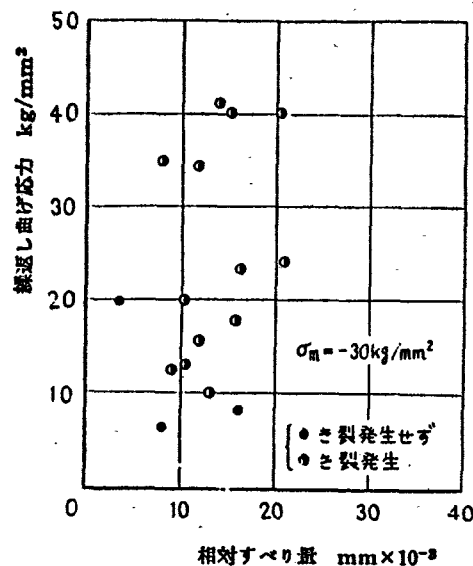


図2-5 圧縮平均応力の場合⁶⁾

圧縮平均応力の場合には、破断していないことが
分る。一方き裂を生じる最小の繰返し応力は、
平均応力の影響をほとんど受けていない。

このようにフレッチング疲労における平均応力
の影響は切欠き材の疲労とよく似ている。

表面加工による表面層の残留応力の影響についで
は、平滑材の疲労試験においてショットピーニング
を施すと表面の硬化と圧縮残留応力との共同作
用により疲労限が大幅に上昇するといわれている。⁷⁾

一方フレッチング疲労でもショットピーニング
によりフレッチング疲労限が上昇するといわれており
特にステンレス鋼のように加工硬化する材料
のときに著しい⁸⁾という報告がある。

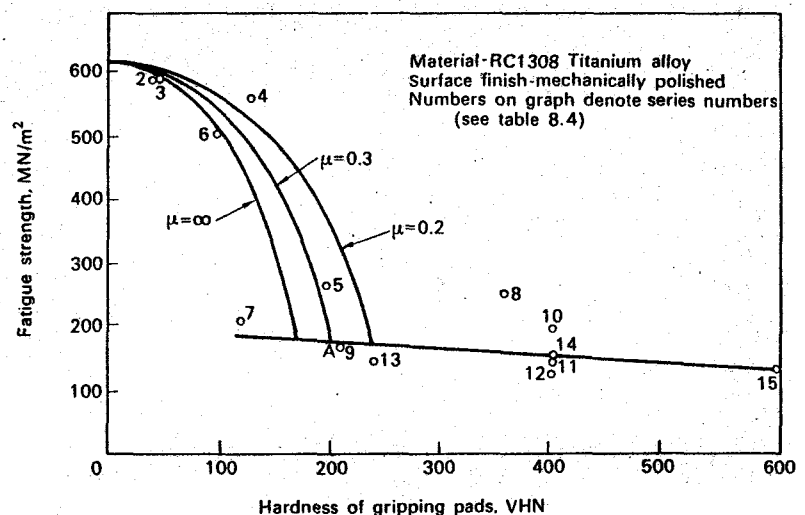
④ パッドの材質の影響

炭素鋼に多くの非鉄および鉄合金のパッドを接触させフレッチング疲労限をもとめた結果⁵⁾によれば、一般的に非鉄合金では純アルミニウム、銅、銀など軟かい材料だと損傷が少ないのに対し、硬い銅合金では損傷が大きい。

Waterhouse⁵⁾によれば、損傷の少ない材料とは硬度が低く、熱伝導率が高く、再結晶温度が低く破壊エネルギーが高く、加工硬化しにくいものが良好とされている。

一方鋼のパッドについては、硬くなるにつれて凝着が少なくなるためフレッチング疲労寿命は増加するという結果もある。

パッドの硬さの影響については、Liu, Corten⁹⁾とSinclair⁹⁾の行った実験があり、チタニウム合金を試験片としパッドには、マグ



ネシウム、アルミニウム、図 2-6 チタニウム合金のフレッチング疲労強度
鋼、銅、ブラス に対するパッドの硬さの影響⁵⁾

など種々の硬度のものを用了。その結果は図2-6で、パッドの硬度が高くなるにつれてフレッチング疲労強度は低下するが、HV 200以上ではほぼ一定となる。

⑤ 加工硬化と熱処理

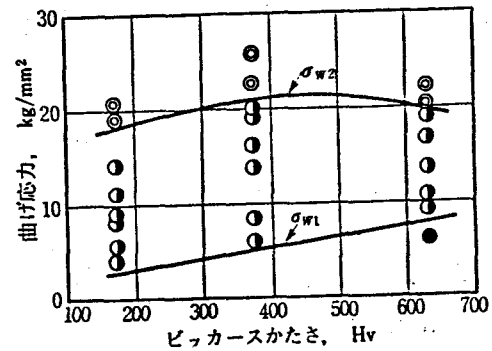
加工硬化により硬さが増すとその結果引張強さや疲労限も上昇する。ところが切欠きやフレッチングを伴うときは必ずしも疲労限の改良とはならない。

Saches と Stefan¹⁰⁾らは、鋼、銅、アルミニウム合金など多くの材料について冷間加工や熱処理を施し、硬い鋼のパッドとフレッチングさせた結果多くの場合加工材は焼なましのものより疲労限が低かった。

炭素鋼で鑄造のものと鍛造のものを比較した結果によれば、鑄鋼の疲労限(フレッチングなし)は、鍛鋼より低いが、フレッチング疲労限では逆に鍛鋼より高くなっている。

一般的結論として、冷間加工や時効硬化などの準安定状態のものは、同じ材料の安定な状態(完全焼きなましや鑄造)のものよりフレッチング疲労に対する抵抗は低いといわれている。⁵⁾

炭素鋼 (S35C 鋼) を
熱処理により硬度を変化
させて フレッチング疲労限
を求めた研究⁴⁾ によれば、
き裂の発生に関する
疲れ強さは、硬度が



高くなるとともに大きく 図 2-7 硬度とフレッチング疲労強度⁴⁾
なる傾向を示すか、 (S35C 炭素鋼)
破断に関する疲れ強さは、
硬度に関係なくほとんど変わらないことが報告
されている。

⑥ 雰囲気の影響

フレッチング摩耗に対する雰囲気の影響については、多くの研究があり、通常の雰囲気では、摩耗に影響をおよぼす因子は、酸素と湿度である。

Ulligh¹¹⁾らの研究によれば、軟鋼のフレッチング摩耗率は、窒素ガスや真空中のような不活性雰囲気では、空気中のときより著しく低いとされている。また湿度は、摩耗量に大きな影響を与え、湿度が上昇すると摩耗量が少なくなる。これは摩耗粉表面に吸収された水分による潤滑作用によるといわれている。

一方フレッチング疲れに対する雰囲気の影響についての研究はあまり多くない。

Liu¹²⁾はチタン合金で、西岡らは0.37%炭素焼き入れ鋼を用いアルゴン中と大気中でフレッチング疲労強度に差がないことを示した。

Hoepfner¹³⁾らは、アルミニウム合金を用い真空中でフレッチング疲労させたときは、空気中のときより10～20倍寿命が長く、フレッチング疲労寿命を減少させるのは化学的な要素が支配的であるとしている。

遠藤・後藤¹⁴⁾の研究によれば、アルミニウム合金

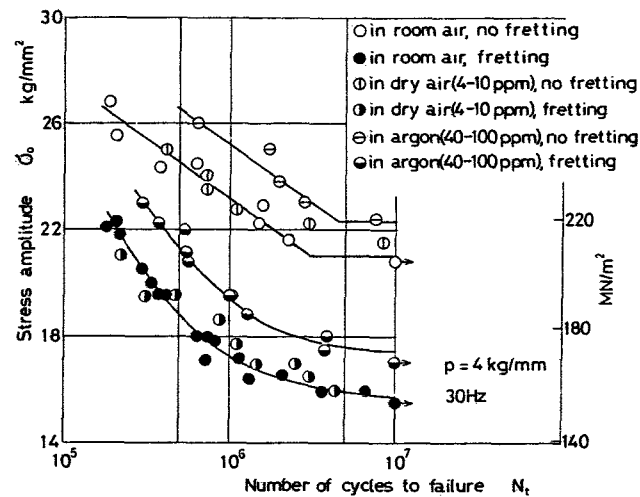


図 2-8 各種雰囲気での疲労曲線¹⁴⁾

では、水蒸気がフレッチング疲れき裂の発生や進行を加速するのに対し、炭素鋼のフレッチング疲労では酸素が重要な影響を与え、き裂の進行はき裂先端の酸素の化学的吸着により左右される。

そのため酸素が存在しないアルゴン中では、き裂の進行率は大きく減小し疲労寿命は増加する。

また、炭素鋼では水蒸気の影響は無視されると報告されている。(図 2-8)

⑦ フレッチング繰返し数の影響

¹⁴⁾ 遠藤・後藤らは、炭素鋼(0.34% C)を用い、面振りの曲げ試験で、フレッチング疲労をある回数繰返したのち、パッドを取り去って同じ応力で大気中の疲労試験を行ない破壊までの全寿命(フレッチング回数を含む)を調べた。

その結果によれば、フレッチング疲労の全寿命のうち始めの20~25%の繰返し数でフレッチング被害は飽和することが達告されている。

その様子を図2-9に示す。

また同様な結論は Fenner のアルミ合金を用いた研究からも得られている。⁵⁾

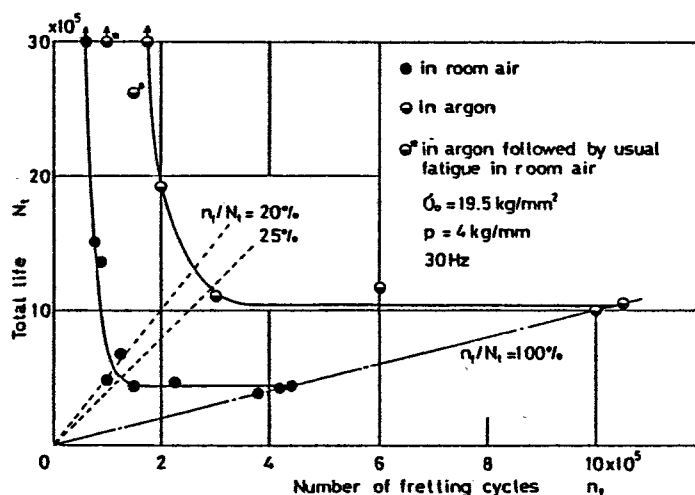


図 2-9 フレッチング疲労被害曲線¹⁴⁾

⑧ 繰返し速度の影響

フレッチング疲労は、機械的因子と化学的因子との強い相互作用のもとで生じる疲労現象と考えられ、応力繰返し速度は酸化という化学的作用に影響を与える。

繰返し速度が変化すると接触面の温度上昇や酸化物の生成に影響を与え、その結果摩擦力の変化となる。繰返し速度が低いと摩擦力の立ち上がりが急で、ピーク値が大きくかつピークに達する繰返し数が小さい。¹⁵⁾ (図 2-10)

また一定の損傷深さに達する繰返し数は、低速ほど小さいため低速のときのほうが破断に至る繰返し数が少ないといわれている。

(図 2-11)

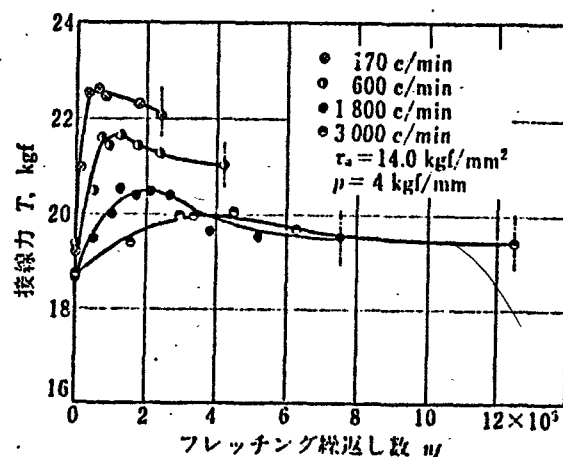


図 2-10 繰返し速度を変えたときの接線力の変化 (0.34% C, ぬいり)

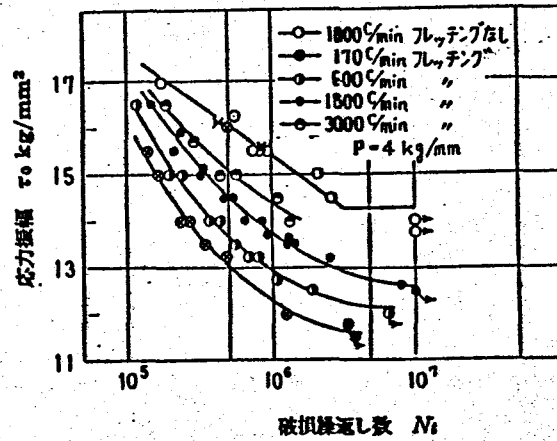


図 2-11 繰返し速度を変えたときの S-N 曲線 (0.34% C ねじり)¹⁵⁾

2-2 フレッチング疲労防止法

フレッチング疲労を軽減したり防止するのに種々の方法が考えられ研究されている。

接触圧力、すべり振幅の大きさ、応力振幅などのパラメータを変えたり、表面処理を施してその効果を調べた報告があるが、これらの中には実験条件や実験装置による影響のために異った結果となっている場合もあり、一般的な結論を導くことは容易ではない。

西岡・平川¹⁶⁾らは、平板の試験片に円筒パッドを接触させたフレッチング疲労の実験から次の式を示した。

$$\sigma_{fw} = \sigma_w - 2\mu P_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{S}{K}\right) \right\} \quad (A)$$

σ_{fw} フレッチング疲労き裂を発生させる応力振幅

σ_w フレッチングなしでき裂を発生させる応力振幅

μ 摩擦係数

P_0 最大ヘルツ圧力

S すべり振幅

K 材料や表面状態に依存する定数

上式はすべり振幅が小さい部分すべりの状態のときのものであるが、さらにすべり振幅が大きい

ときは

$$\sigma_{fw} = \sigma_w - 2\mu P_0 \quad (B)$$

となる。

これらの式より フレッチング疲労を防止するには、すべり振幅を小さくし、接触面圧と摩擦係数を低下させることである。

しかし、実際の機械要素に フレッチングが生ずる場合には、接触面圧を小さくすれば、すべり振幅が大きくなり、すべり振幅を小さくするには面圧を高くする必要があるという場合が多く、両者を同時に満足させることは不可能に近い。

このような特性を持ったため 防止法は個々の状況により変化する。

今までに行なわれた防止法としては 次のような方法がある。

(1) 材料の疲労強さを上昇させる。

(2) すべり振幅を小さくする。

a 2面間の摩擦を増大させて相対すべりを抑える。

凝着係数の大きい材料を組合わせたり、形状を変更し面圧が集中する形状とする。

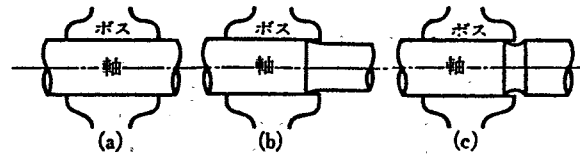


図 2-12 面圧の集中によるフレッチング抑制の例¹⁷⁾

b. 2 面間の摩擦を増大させるような表面処理を施す。

(3) 接触面圧を低下させる。

a. 接触部の形状を変更し、接触面圧の集中を緩和させる。

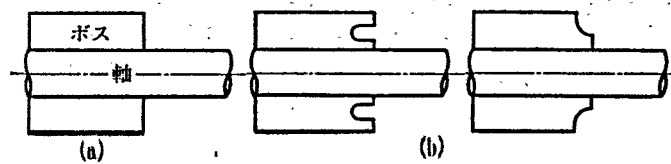


図 2-13 接触面圧の集中緩和による向上法¹⁷⁾

b. 接触面に弾性係数の低い弾性体を挿入する。

挿入物の弾性変形により相対すべりを吸収し、かつ面圧の集中を緩和する。

c. 相手材の硬度を低くする。

(4) 摩擦係数を小さくする。

- a. テフロンコーティングを施す。
- b. 潤滑油を付与する。
- c. 摩擦係数が低下する表面処理を施す。

(5) 表面処理を施す。

a. 化学的表面処理

リン酸塩皮膜が有効とされている。

b. 機械的表面処理

ショットピーニング、ロールピーニングなどにより表面圧縮残留応力が効果的とする報告が多い。

c. 金属皮膜を付与する。

プラズマ溶射や爆発溶射によるカーバイド/金属の混合物は、摩擦係数を低下させ、それらの表面に平行な層状構造が有効とされている。¹⁸⁾

電気めっきについては、次章で触れる。

(6) 潤滑材を付与する。

潤滑材は、摩擦係数を低下し、酸素との接触を制限する。また潤滑油が流れていると摩耗粉を除去するため有効といわれている。

法線方向の振動を伴うときは、潤滑油が逆に損傷を大きくすることもある。

3 章 電気めっきとその影響

めっきは工業上腐食を防止し、耐摩耗性の向上や外観を保護するために用いられる。適当な条件で行なわれためっきの機械的性質は、その金属の機械的性質に等しいか時には優る。

めっき材の静的荷重の下での強度は、一般にめっきにより影響されないが、ピッキングやめっきの過程で水素脆化を受けると低下する。

同じめっき溶液を使用しても電解条件や温度によりめっき層の性質が変わる。

電流効率が同じときは、電流密度の大きいほうが析出量が多いため一般的に電流密度の大きい条件が選ばれる。

また、電流密度が大きいと生成する結晶核の数が多く、結晶粒子が細かく、緻密で強固なめっきが得られる。同時に電流密度の増加により均一電着性も向上する。

一方電流密度を高くする場合の欠点として電流効率が悪くなること、海綿状またはやけた電着となること、内部応力が増大しめっきにき裂を生じることなどがあげられる。

めっき溶液の温度が高いと結晶核が促進さ

れて結晶粒が大きくなり硬さが低下する。
また、電着における分極が減少し、均一電着性は悪くなる。

しかし、高温では、金属塩の溶解度が増し、導電度が向上し、大電流の使用が可能となる。また、溶液温度が高いときは、液の粘着性が減少し、めっき中への水素の吸収が少なくなり、めっき層の内部応力が減少するなど利点がある。

次に今回の実験で使用しためっきに関しその一般的な性質と鋼の疲労に与える影響について述べる。

3-1 ニッケルめっき

ニッケルめっきは、ワット型溶液（硫酸ニッケル、塩化ニッケル、ほう酸）とスルファミン酸溶液から得られるものがある。

機械的性質は、液組成やめっき条件によってかなり変化するが（図3-1 参照）ワット型のものは硬く内部応力が高い。

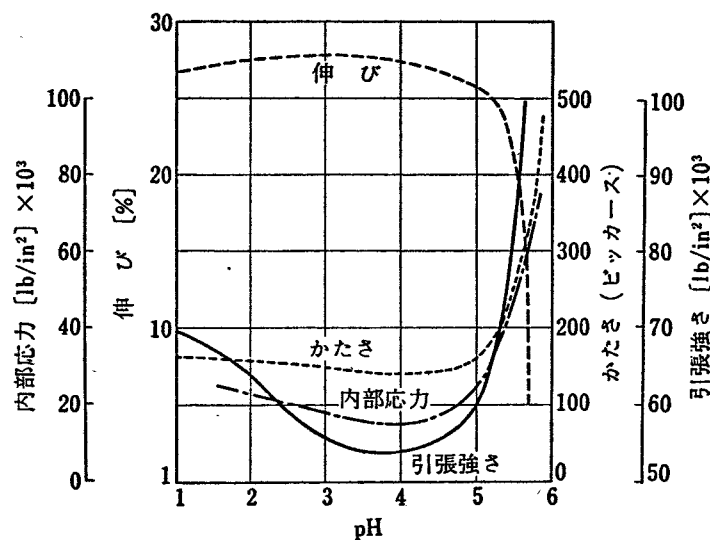


図3-1 ワット型ニッケルめっき液の pH とかたさ、引張強さ、伸び、内部応力の関係¹⁹⁾

スルファミン酸のものは、柔軟で内部応力も小さい。そして内部応力と疲労限との間には、直線関係があり、内部応力が大きい程疲労限は低下する。また、めっき厚さが増すと疲労限の低下割合が増すといわれている。

最近の研究によれば、²⁰⁾ Lee & Jones はスルファミン酸溶液を用いて電流密度と電解液の温度を変えることにより内部応力を引張りから圧縮まで制御しためっきを軟鋼に施し、その疲労特性を調べた。(図 3-2)

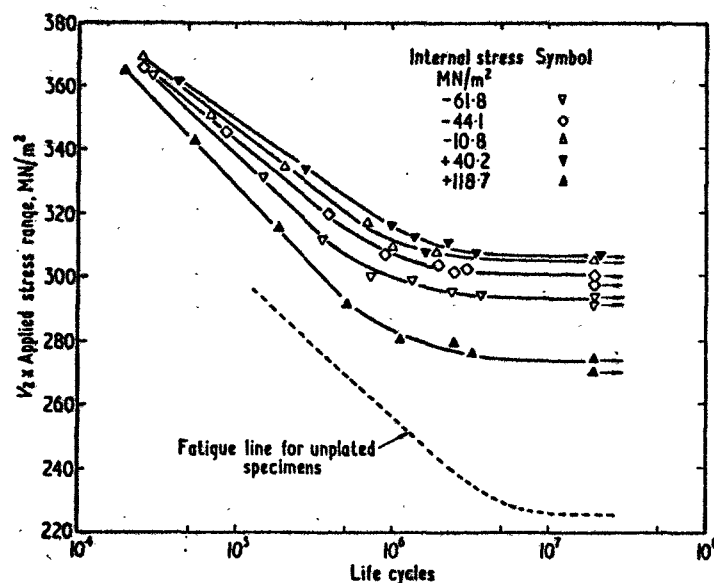


図 3-2 軟鋼に内部応力の異なるニッケルめっきを施したときの疲労曲線²⁰⁾

これによれば、めっきした試験片はすべてめっきしないものより疲労強さが優っていて、 40.2 MN/m^2 の引張内部応力のとき(このときの硬度は 145 Hv)に最大の改善が見られた。

一方、フレッチング疲労に対するニッケルめっきの影響については、フレッチングを伴わないときの疲労と同様に²¹⁾良い結果は得られておらず、有害という報告がある。

しかし、²²⁾ Lee と Jones らは スルファミン酸 溶液 からの
ニッケルめっきを用いて フレッチング疲労限も改善さ
れることを報告している。

このとき 圧縮内部応力の大きいときに 疲労限が
高かったが、フレッチングを伴わないときの疲労限
までは回復しなかった。

3 - 2 クロムめっき

クロムは、特に硬く通常では化学的に不活性で、耐摩耗性・耐熱性にすぐれている。

めっきにより得られるクロムは、結晶粒子がより微細であること、内部応力が大きいこと、水素を吸蔵していることなどにより高い硬度となる。

(硬質クロムめっきは、JIS に規定してある工業用クロムめっきのことで Hv 700 以上である。)

クロムめっきにより摩擦係数は低下する¹⁹⁾。

	静止摩擦係数	動摩擦係数
鋼 と 鋼	0.30	0.20
鋼 と クロムめっき鋼	0.17	0.16
クロムめっき鋼とクロムめっき鋼	0.14	0.12

電気めっきされたクロムは、引張内部応力を持ち、鋼にクロムめっきを施すと一般に疲労限が低下するといわれている。これはクロムめっき層のき裂が母材表面の応力集中として作用するためとされている²⁹⁾。

Stareck²³⁾ は、鋼にクロムめっきを施したときの疲労強度の低下割合は、クロムめっき層の内部応力の直線的関数としている。

フレッチング摩耗に対しては、クロムの硬い皮膜が接触面の凝着を低下させるため、クロムめっきが非常に有効だという報告²⁴⁾があるが、フレッチング疲労に対しては、効果がない〔Mc Dowell (1953)〕、又は有害であるとされている。しかし、車輪と車軸のはめ合い部にクロムめっきを施して疲労強度が改善された例もある。

3-3 銅めっき

銅めっきは、変色しやすいためこれ自体で装飾用や耐食用の目的には使用されないが、金・銀・ニッケルめっきの下地めっきとして広く利用されている。工業的には電鍍・鋼の渗炭防止などにも利用されている。

銅めっきには、酸性液から得られる硫酸銅めっきとアルカリ液から得られるシアン化銅めっきとが一般的である。

硫酸銅めっきは、高度の光沢と平滑作用があり、その硬度は添加剤や電流の波形により変化するが100～250 Hvである。陰極電流効率も、100%に近いが、直接鉄素地にめっきすることができないので、あらかじめシアン化銅めっきまたはニッケルめっきを行なう必要がある。これらのめっきでカバーされていないと硫酸銅めっき液におかされる。

シアン化銅めっきは、鉄の上に直接めっきができ、他の銅めっきよりもつきまわりがすぐれている。

また、同一電流密度、同一電流効率で同一時間めっきすれば、硫酸銅めっきの2倍の厚さが得られる。

(今回の実験では硫酸銅めっきおよびシアン化銅めっきの両方を用いた。)

銅めっきを用いたフレッチング疲労の研究は、
²¹⁾Waterhouse が行ない、フレッチング疲労限はめっき
皮膜厚さの 2 乗に比例して上昇することを示した。
彼はこの原因について銅めっきは比較的柔らかく
伝導性が高く陰極効率が高いため皮膜中にき裂
はなく内部応力が低いことを挙げている。

3-4 カドミウムめっき

カドミウムは、鉄に対してすぐれた防錆力を持ち特に塩水に対して良好な結果を示すため航空機部品、電気通信部品などに用いられる。

シアン化カドミウムめっきの陰極効率²⁵⁾は、100%以下なのでめっき中は必ず水素ガスが発生する。この水素が鋼に吸着され水素脆化をまねくので特に高力鋼では、疲労強度が10~20%低下する。しかし、一般の中炭素鋼の疲労にはほとんど影響はないとされている²⁵⁾。

フレッチング疲労にカドミウムめっきを用いた研究は見あたらなかった。

3-4 亜鉛めっき

亜鉛めっきは、鉄に対して電気化学的に防錆効果がきわめて大きく、広く一般に用いられている。

この皮膜は、延性に富み弱い²¹⁾ため、鋼母材の疲労強度に直接機械的な影響を与えることはなく時には上昇させたりする。

フレッチング疲労に対しては、Waterhouse²¹⁾の研究によればフレッチング疲労限をわずかに改善したことが報告されている。

3-5 銀めっき

銀めっきは、電気抵抗が小さく熱伝導率が高いなどすぐれた性質をもつので電気接点、軸受など利用の用途は広い。

銀は電気化学列が多くの金属の下位にあるので、銀めっき前には、鉛濃度が低くシアン化カリの多い液でストライク銀めっきか又は5~10 μm の銅めっきを行ってから銀めっきを行う必要がある。

今回の実験には、約5 μm の銅めっきと銀めっきのものを用了。

鋼に銀めっきを施した疲労に関するデータは見当らなかったが、フレッチング疲労に関しては、Waterhouse Gray & Jenny (1944) らが有効性を示している。

4 章 フレッチング条件下で接触表面に作用する応力

いま、図4-1のように円筒が垂直力 P で接触し、さらに接線方向の力 T が作用するとき、試験厚さが十分に厚い場合には、応力状態を半無限板と円筒との接触と考えることができる。

また、接触面圧の分布 $P(x)$ は、接線力の存在下で Hertz の理論が成立するものとする。

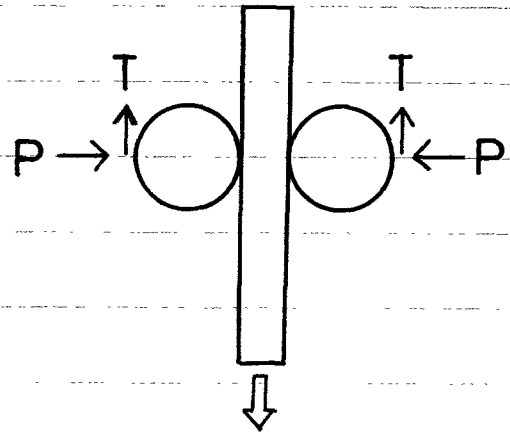


図 4-1

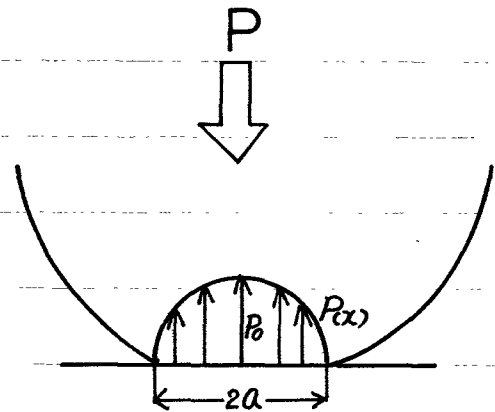


図 4-2

$$P_0 = \frac{2P}{\pi a}$$

$$2a = \sqrt{\frac{8PR(1-\nu^2)}{\pi E}}$$

$$P(x) = P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (1)$$

P_0 最大接触面圧

$2a$ 接触幅

P 押付荷重

R 円筒の半径

E 弾性係数

ν ポアソン比

摩擦係数は相対すべり量が大きくなるとほぼ一定となるので、この値を μ とする。

接線力 T が μP より大または等しいとき ($T \geq \mu P$) 接触面には μP の力が作用する。

接線力 $g(x)$ の分布は、 $\mu P(x)$ に等しいと仮定すると

$$g(x) = \mu P_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (2)$$

(1)(2) 式で境界条件が与えられる場合の接触応力は、Smith, Liu²⁶⁾ により解析されている。

それによると 図4-3, 図4-4 のように境界に集中力 P, g が垂直方向または接線方向に作用するときの応力は、弾性論で平面応力の問題として解が得られている。

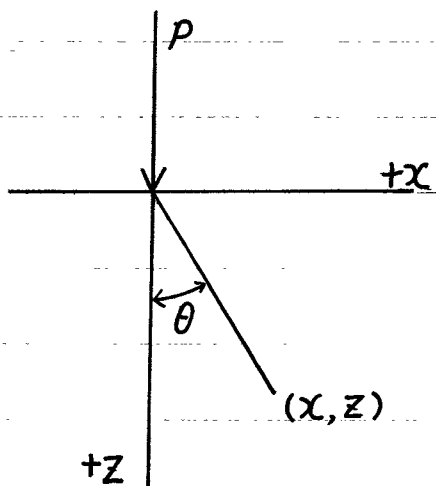


図4-3 垂直方向集中力 P が作用するとき

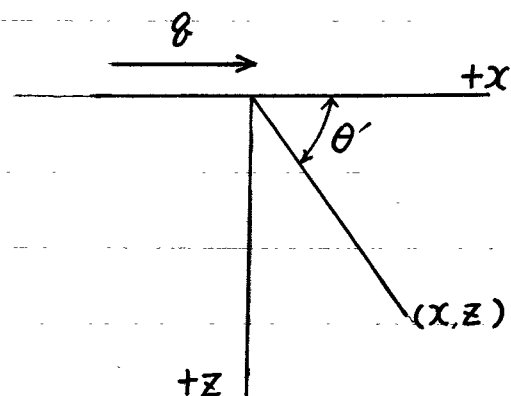


図4-4 接線方向集中力 g が作用するとき

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= -\frac{2P}{\pi z} \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\
 \sigma_z &= -\frac{2P}{\pi z} \cos^4 \theta \\
 \tau_{xz} &= -\frac{2P}{\pi z} \sin \theta \cos^3 \theta \\
 \theta &= \text{Arc Cos } \frac{z}{\sqrt{z^2 + x^2}}
 \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= -\frac{2P}{\pi z} \cos^3 \theta' \sin \theta' \\
 \sigma_z &= -\frac{2P}{\pi z} \cos \theta' \sin^3 \theta' \\
 \tau_{xz} &= -\frac{2P}{\pi z} \sin^2 \theta' \cos^2 \theta' \\
 \theta &= \text{Arc Cos } \frac{x}{\sqrt{z^2 + x^2}}
 \end{aligned} \right\} (4)$$

また 応力が 図4-5, 図4-6 のような分散荷重
のときは, 次のように与えられる。

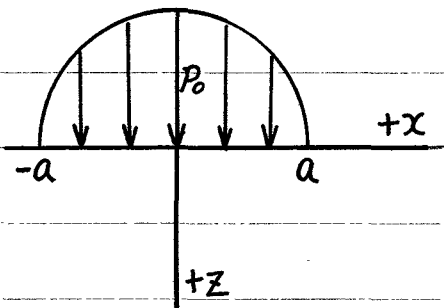


図 4-5 分散垂直力

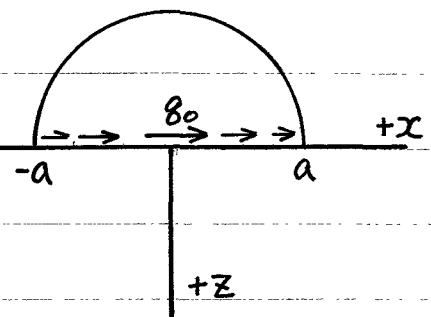


図 4-6 分散接線力

1) 分散垂直力による応力

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xn} &= -\frac{p_0}{\pi} z \left(\frac{a^2 + 2x^2 + 2z^2}{a} \Psi - \frac{2\pi}{a} - 3x\psi \right) \\ \sigma_{zn} &= -\frac{p_0 z}{\pi} (a\Psi - x\psi) \\ \tau_{xzn} &= -\frac{p_0}{\pi} z^2 \psi \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \Psi &= \frac{\pi}{K_1} \frac{1 - \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}}{\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \sqrt{2\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \left(\frac{K_1 + K_2 - 4a^2}{K_1} \right)}} \\ \psi &= \frac{\pi}{K_1} \frac{1 + \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}}{\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \sqrt{2\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} + \left(\frac{K_1 + K_2 - 4a^2}{K_1} \right)}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_1 &= (a+x)^2 + z^2 \\ K_2 &= (a-x)^2 + z^2 \end{aligned}$$

2) 分散接線による応力

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{xt} &= -\frac{\rho_0}{\pi} \left[(2x^2 - 2a^2 - 3z^2)\psi + 2\pi\frac{x}{a} + 2(a^2 - x^2 - z^2)\frac{x}{a}\psi \right] \\
 \sigma_{zt} &= -\frac{\rho_0}{\pi} z^2\psi \\
 \tau_{xzt} &= -\frac{\rho_0}{\pi} \left[(a^2 + 2x^2 + 2z^2)\frac{z}{a}\psi - 2\pi\frac{z}{a} - 3xz\psi \right]
 \end{aligned} \right\} (7)$$

3) 分散垂直力による境界上の応力

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{xn z=0} &= \begin{cases} -\rho_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} & |x| \leq a \\ 0 & x > a, x < -a \end{cases} \\
 \sigma_{zn z=0} &= \begin{cases} -\rho_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} & |x| \leq a \\ 0 & x > a, x < -a \end{cases} \\
 \tau_{xzn} &= 0
 \end{aligned} \right\} (8)$$

4) 分散接線力による境界上の応力

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_{xt z=0} &= \begin{cases} -2\rho_0 \left(\frac{x}{a} - \sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1} \right) & x \geq a \\ -2\rho_0 \left(\frac{x}{a} + \sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1} \right) & x \leq -a \\ -2\rho_0 \frac{x}{a} & |x| \leq a \end{cases} \\
 \sigma_{zt z=0} &= 0 \\
 \tau_{xzt z=0} &= \begin{cases} -\rho_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} & |x| \leq a \\ 0 & x > a, x < -a \end{cases}
 \end{aligned} \right\} (9)$$

以上の応力をプロットすると図4-7 から
図4-10 のようになる。

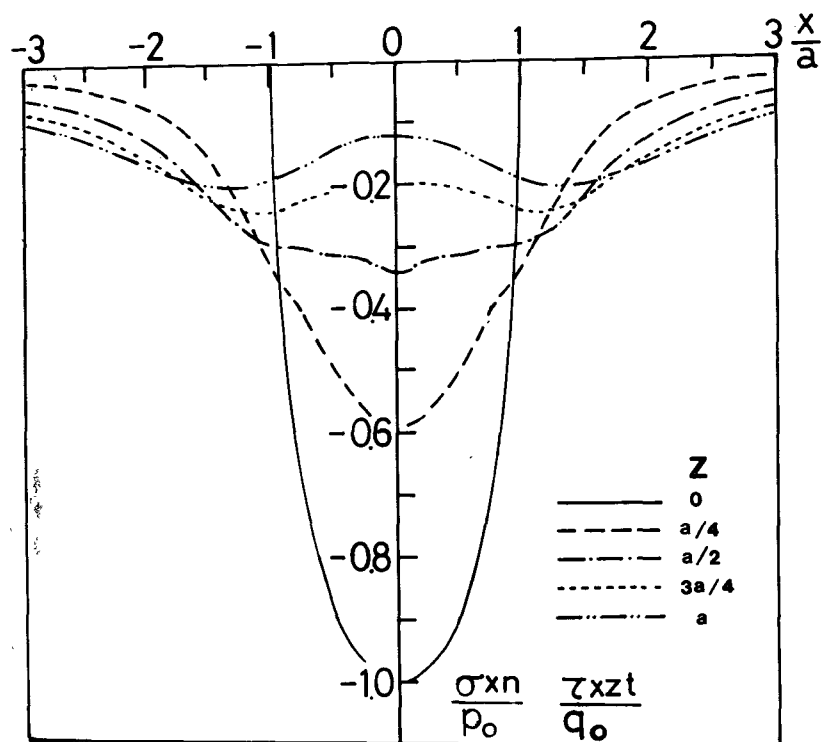


图 4-7 σ_{xn} 及 τ_{xzt}

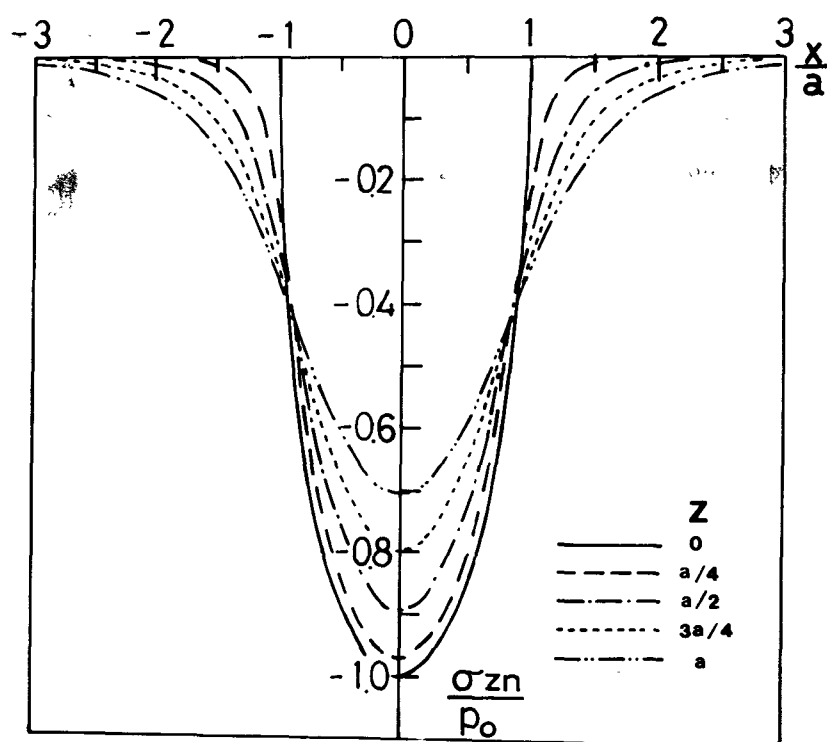


图 4-8 σ_{zn}

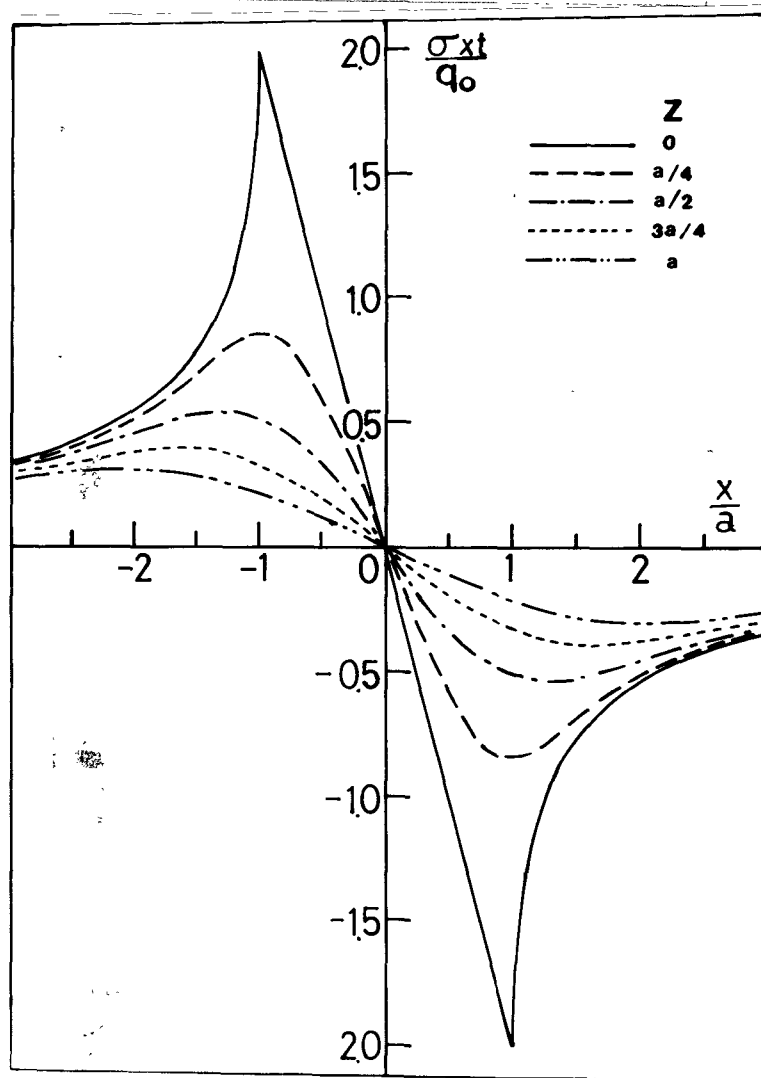


图 4-9 σ_{xt}

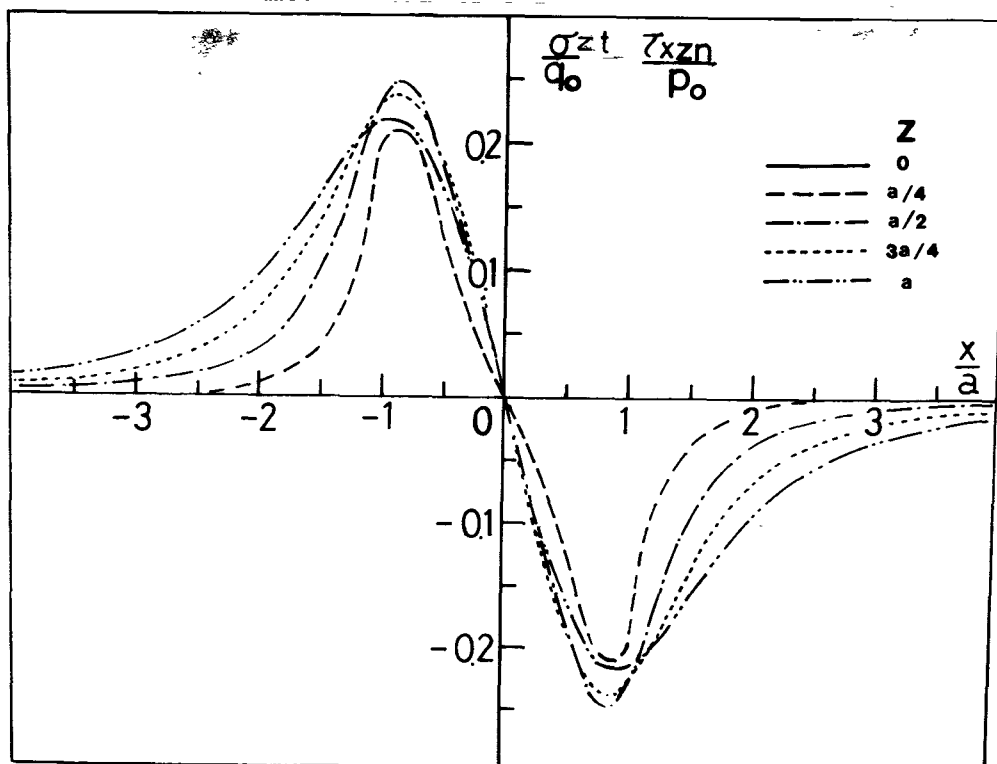


图 4-10
 σ_{zt} 及 τ_{xzn}

実際には、垂直力と接線力とは同時に作用するため両者を重ね合わせる必要がある。

Mindlinによれば、摩擦係数を μ とすれば、

$$q_0 = f p_0$$

となる。従って σ_x , σ_z , τ_{xz} は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{p_0}{\pi} \left\{ (a^2 + 2x^2 + xz^2) \frac{z}{a} \psi - \frac{2\pi z}{a} - 3xz\psi + \mu[(2x^2 - 2a^2 - 3z^2)\psi + 2\pi \frac{x}{a} + 2(a^2 - x^2 - z^2) \frac{x}{a} \psi] \right\} \psi \\ \sigma_z &= -\frac{p_0}{\pi} z (a\psi - x\psi + \mu z\psi) \\ \tau_{xz} &= -\frac{p_0}{\pi} \left\{ z^2\psi + \mu[(a^2 + 2x^2 + 2z^2) \frac{z}{a} \psi - \frac{2\pi z}{a} - 3xz\psi] \right\} \psi \end{aligned} \right\} (10)$$

さらに境界上では次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xz=0} &= \begin{cases} -2\mu p_0 \left(\frac{x}{a} - \sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1} \right) & x \geq a \\ -p_0 \left(\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + 2\mu \frac{x}{a} \right) & |x| \leq a \\ -2\mu p_0 \left(\frac{x}{a} + \sqrt{\frac{x^2}{a^2} - 1} \right) & x \leq -a \end{cases} \\ \sigma_{zz=0} &= \begin{cases} -p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} & |x| \leq a \\ 0 & x \geq a, x \leq -a \end{cases} \\ \tau_{xz=0} &= \begin{cases} -\mu p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} & |x| \leq a \\ 0 & x \geq a, x \leq -a \end{cases} \end{aligned} \right\} (11)$$

これまで応力を平面応力の状態で考えたが、
平面ひずみの状態で考えると、 σ_y (xz 平面に垂直)
は次のようになる。

$$\sigma_y = \nu(\sigma_x + \sigma_z) \quad (12)$$

今回の実験に適合するように

$$\mu = 0.7$$

$$\nu = 0.3$$

とし $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xz}$ を計算し、プロットすると
図4-13から図4-16のようになる。

さらにこれらを用いて主応力を求めると
図4-17から図4-19のようになる。

次に σ_x に垂直方向と主応
力 σ_1 に垂直な方向とのなす角
を θ とし、時計回りの方向
を正とすれば、 θ は次式で
表わされる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\tau_{xz}}{\sigma_x - \sigma_z} \quad (13)$$

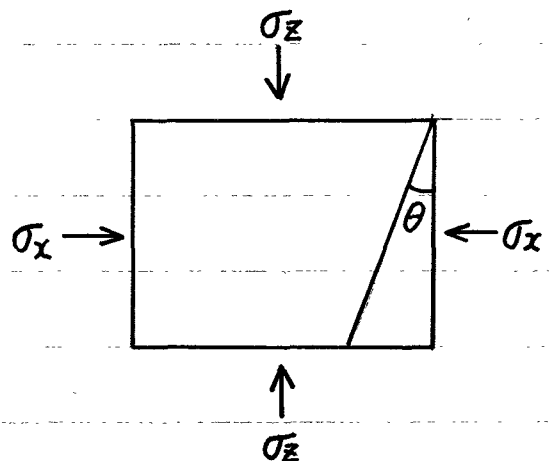


図4-11

(13) 式に境界上の $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ を代入してプロットすると図4-20 のようになる。

表面皮膜を有するときの応力状態

接触表面に表面皮膜を有するときは、表面皮膜の剛性率を小さくすることにより圧力分布の平均化が図られることが報告²⁷⁾されている。(図4-12)

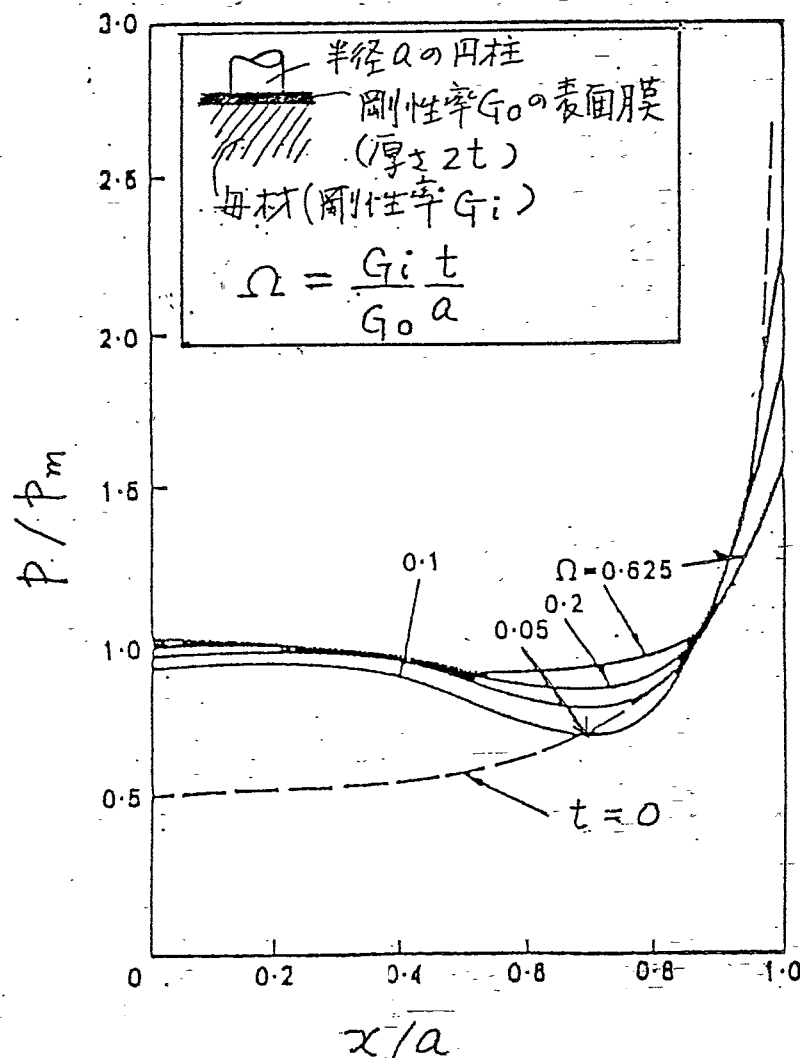


図 4-12 接触圧力におよぼす表面皮膜の影響

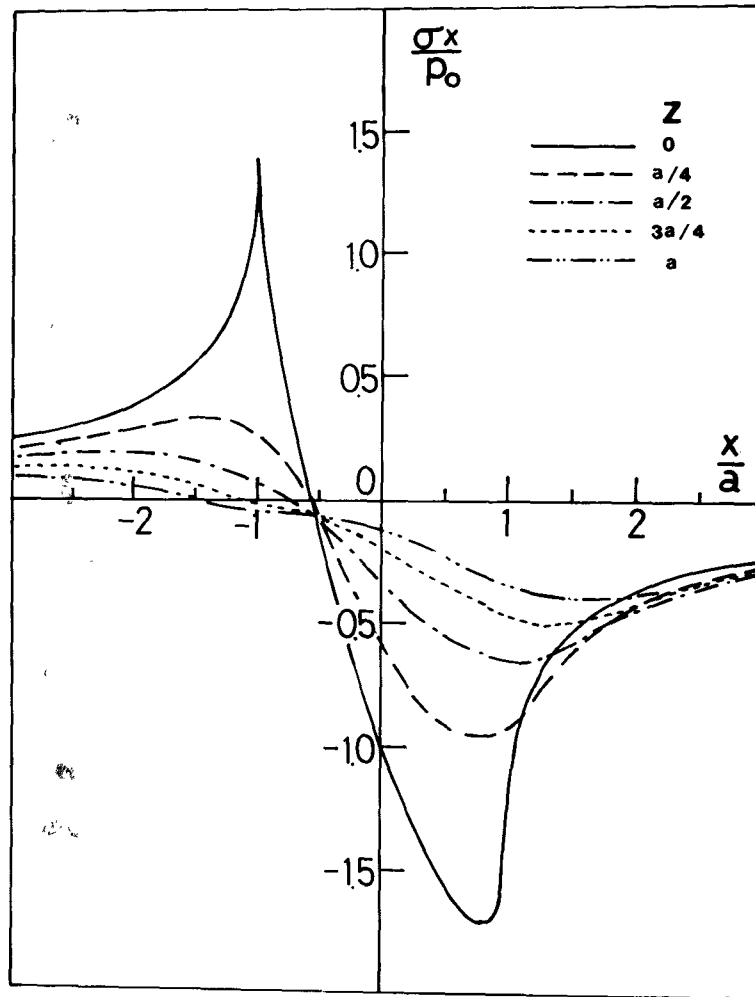
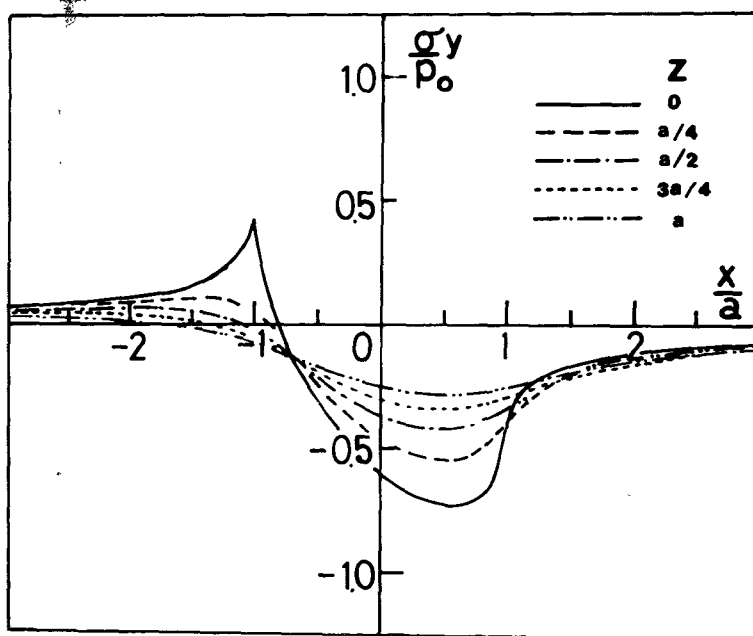
27) p : 接触圧力
 p_m : 平均圧力
 x : 円柱中心からの距離

また最近の研究²⁸⁾として、薄くて硬い皮膜をもつ平面に球を押しつけたときの応力状態を有限要素法を用いて解析した報告がある。

これによると薄くて硬い皮膜があると、皮膜と母材との界面では、半径方向応力および円周方向応力ともに低下する。この低下率は、皮膜のヤング率や厚さが増すにつれて大きくなる。

これは硬い皮膜のために母材表面の変位が妨げられるためである。

しかし、界面でのせん断力は2倍以上増加し皮膜の剥離に至るとされている。

图 4-13 σ_x 图 4-14 σ_y

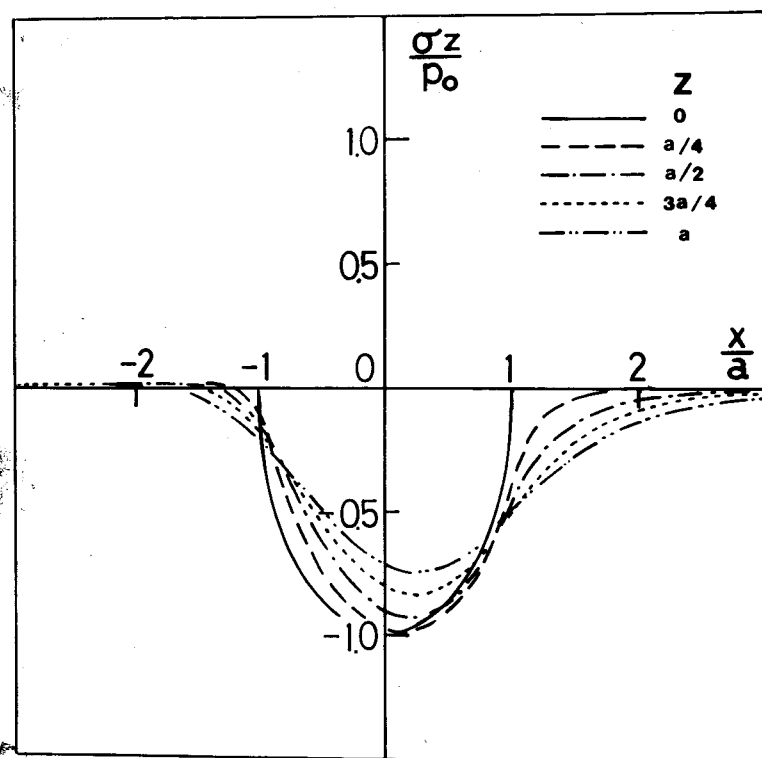


图 4-15 σ_z

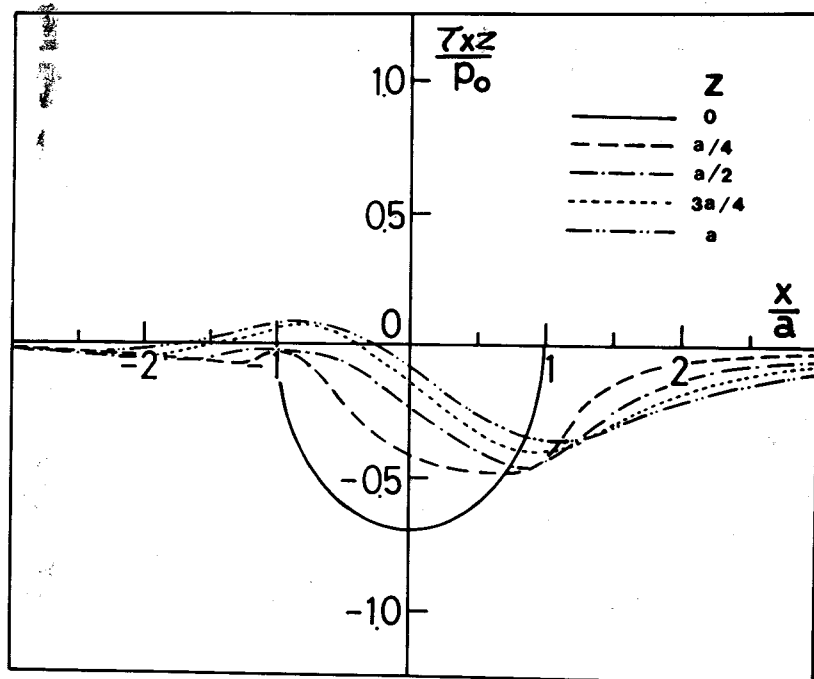


图 4-16 τ_{xz}

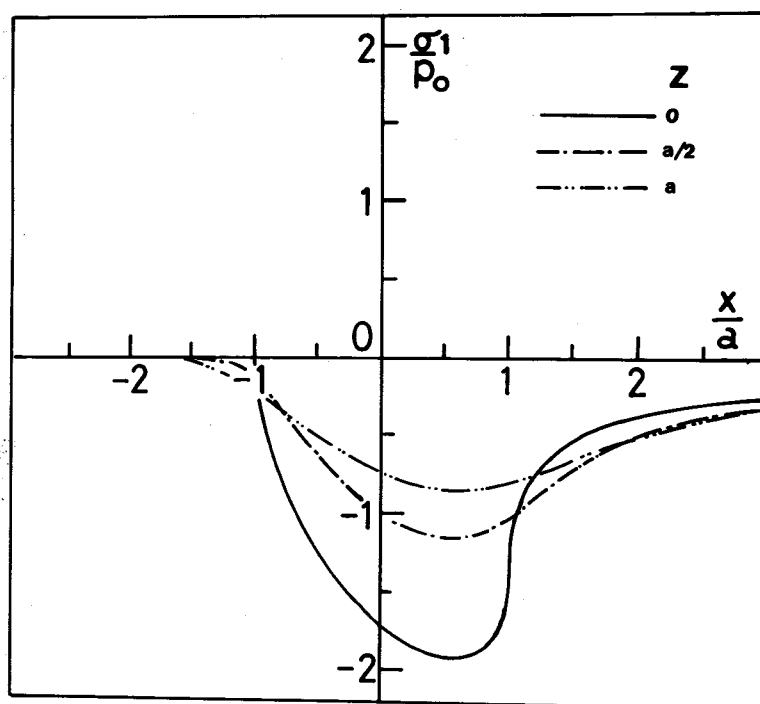


图 4-17 σ_1

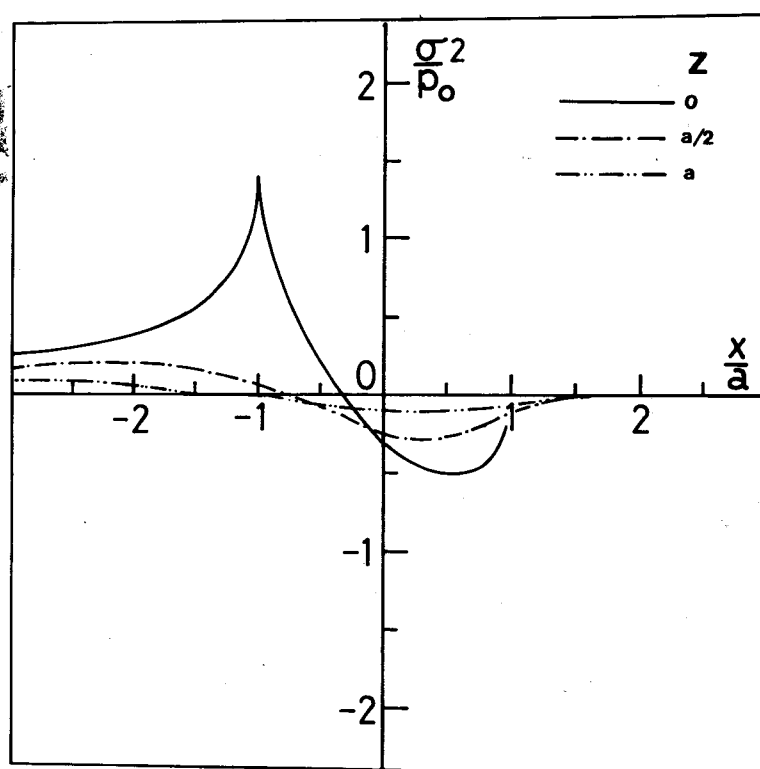


图 4-18 σ_2

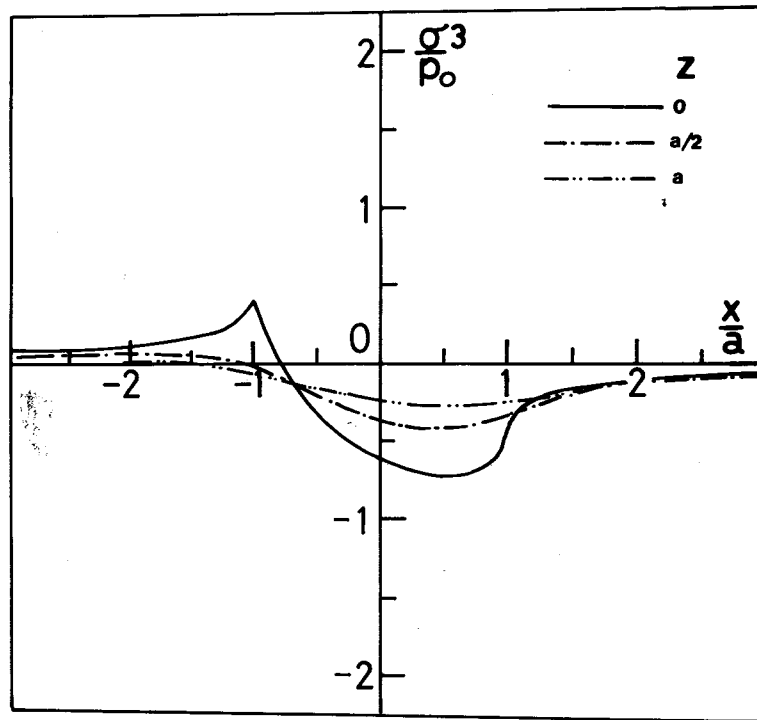


図 4-19 σ_3

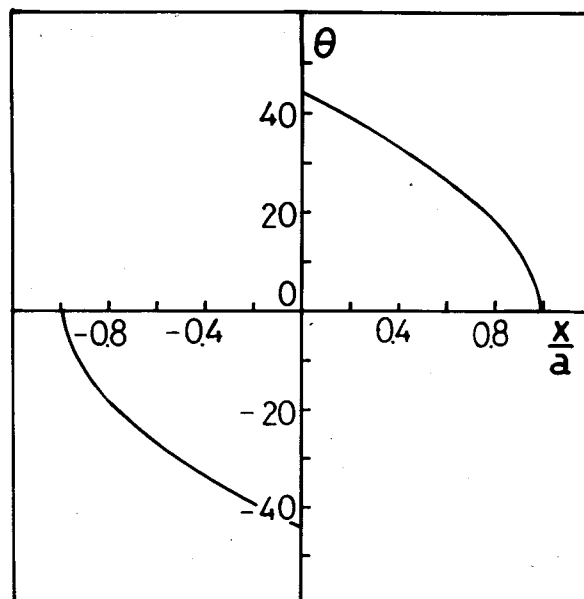


図 4-20 θ の変化

5 章 実験装置と実験方法

5-1 フレッシング疲労試験装置

実験に用いた試験機は、油圧式引張圧縮疲労試験機で、荷重を $\pm 5 \text{ ton}$ の範囲で、繰返し速度は $0.001 \sim 40 \text{ Hz}$ まで可変である。その外観図を図 5-1 に示し、フレッシング発生装置を図 5-2 に示す。

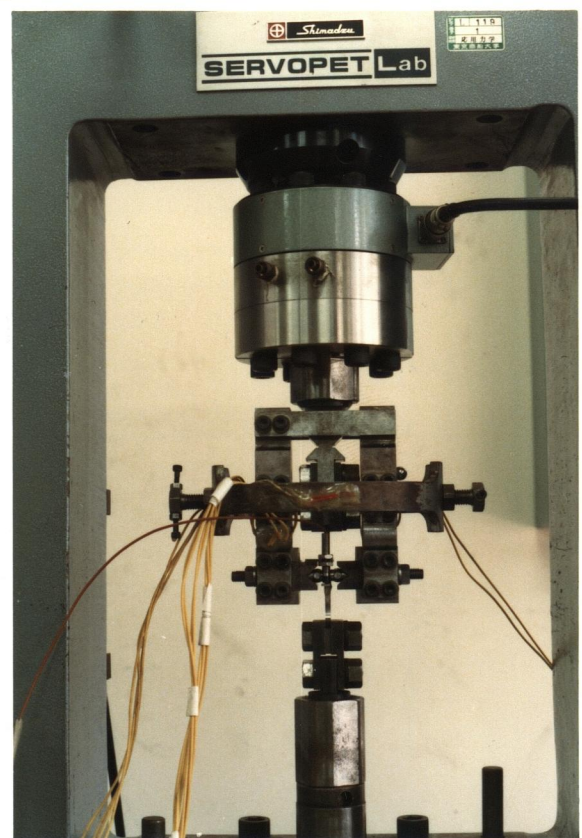


図 5-1 フレッシング疲労試験装置

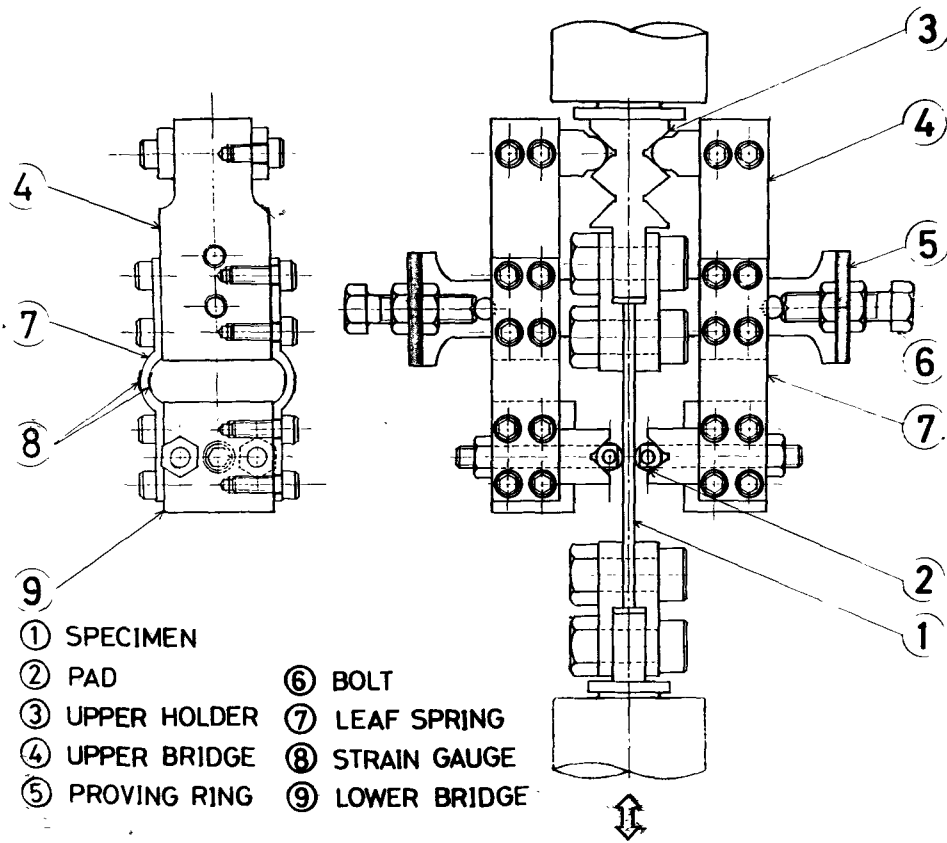


図 5-2 フレッチング発生装置

図 5-2 において、試験片①の上部は、試験片ホルダ(上)③を介してロードセルに連結され、下部は試験片ホルダ(下)を介して油圧ピストンに連結されている。

ブリッジ上部④の脚部の半円筒は、試験片ホルダ(上)③のV溝に入り、円周方向の動きは可能であるが、上下方向の動きは阻止されている。

ブリッジ下部⑨は、パッド②を保持しておりパッド②は試験片①と均一に接触するようになっている。

油圧ピストンに油圧が作用すると、試験片が弾性変形し、パッドとの間には相対的な変位が生じ、フレッチングを起こす。

ブリッジ上部④と下部⑨の間は、湾曲させることにより剛性を落とした板バネ⑦を介して取付けてある。湾曲部にはひずみゲージを貼り、摩擦力を検出できるようにし、その出力をビジグラフで記録した。

接触荷重は、左右のブリッジをフルービングリング（リングバネ）⑤のボルト⑥を締付けることにより付与され、その値はフルービングリングに貼り付けたひずみゲージにより測定され、ペンレコーダに指示記録させた。

相対変位は、図5-3に示すようにブリッジ下部のパッド支持金具に非接触式変位計③を取り付け、一方試験片のパッドとの接触部近傍の側面にし字型の対極板②を接着剤で固定しその動きの変化をビジグラフに記録した。

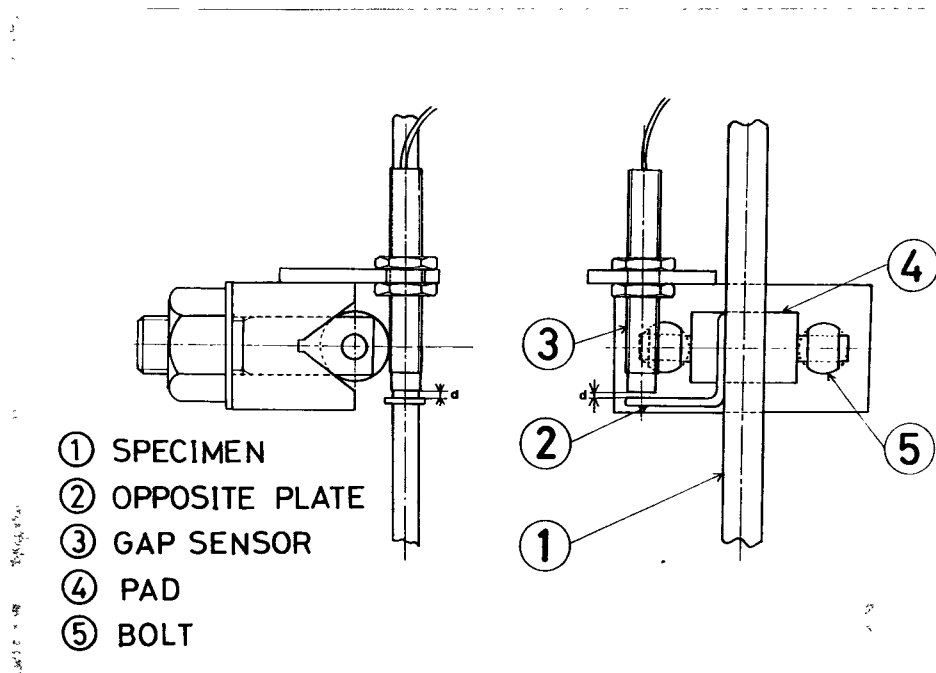


図 5-3 変位の検出

5-2 試験片

試験片は図5-4に示すように板試験片と円筒パッドである。

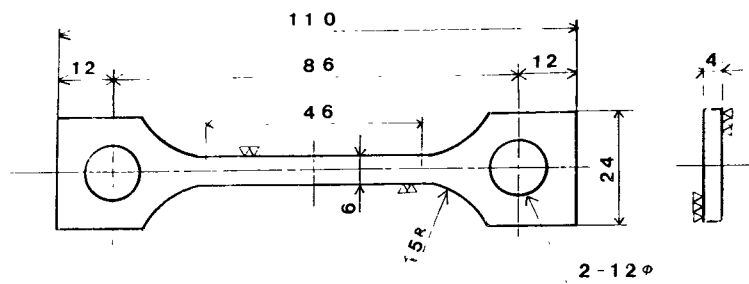
板試験片は、S45C鋼を850℃で1時間保持にて焼ならしを行なった後機械加工した。そして長さ方向に研削した後、#240から#1500のイメリーペーパーで表面の最終仕上げを行なった。

円筒パッドは、S45C鋼とSK5(工具鋼)の2種類を用いた。

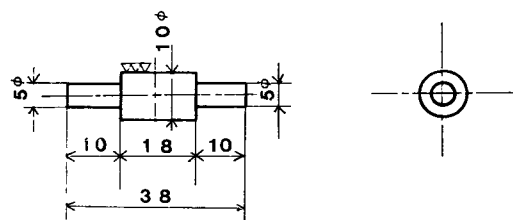
S45Cパッドは、丸棒を板試験片と同様な条件で熱処理を施し、機械加工後同様にイメリーペーパーで表面仕上げを行なった。

SK5パッドは、市販のドリルロッドと呼ばれるものを使用し、熱処理を行なわずに機械加工と表面仕上げを行ない実験に供した。

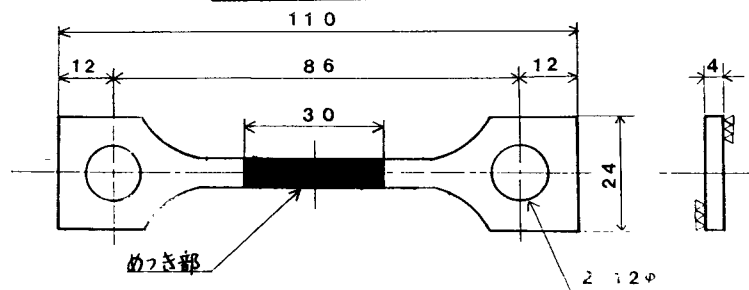
これらの化学成分を表5-1に示す。



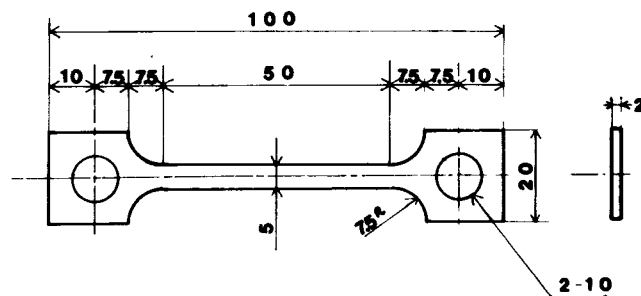
板試験片



ポット



めっき試験片



薄形試験片

図5-4 試験片の形状

薄形試験片

実験の一部に用いた薄形試験片の形状を図5-4に示す。

この材質はS45Cで前述の板試験片と同じ条件で熱処理、機械加工、表面仕上げを行なった。

その化学成分は表5-1に示すとおりである。

表5-1 試験片の化学成分

	化 学 成 分 %									硬さ
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Pb	Hv
4mmt S45C 板試験片	0.46	0.22	0.77	0.013	0.01	-	-	-	-	190
2mmt S45C 板試験片	0.48	0.22	0.68	0.21	0.016	-	-	-	-	183
S45C ハット	0.47	0.24	0.68	0.17	0.14	0.07	0.03	0.07	-	175
SK5 ハット	0.95	0.20	0.65	0.12	0.06	0.11	0.03	0.13	0.20	255

めっき試験片

フレッチング疲労に対するめっきの影響を調べるために試験片の一部にめっきを施した。

前述の板試験片(S45C 4mm厚)に前述と同じ熱処理、機械加工および表面仕上げをすべて終わったものについてめっきを行なった。

めっきは図5-4に示すように試験片の平行部の一部に施した。使用した各種めっきの厚さと硬度を表5-2に示す。

厚さは、試験終了後切断し断面を顕微鏡観察して求めた。

硬度は、微小硬度計を用いて測定し平均的な値を求めた。

なおめっき加工は外部に依頼し一般の工業的なものを施したので、詳細な条件つまり電流密度、溶液の温度、添加物等については把握できなかった。

表5-2 各種めっき材の性状

種 類	硬度 Hv	測定荷重	厚さ μm	溶液の種類
		gr		
Cd	22	10	30-35	シアン化カドミウム
Zn	95	10 25	35-40	シアン化亜鉛
Ag	110	10 25	Cu 4-5 Ag 25-30	シアン化銀
Cu(SO)	210	25 50	30-45	硫酸銅
Cu(CY)	100	10 25	25	シアン化銅
Ni	550	25 50	12-15	ワット液
Cr	750	25 50	12-15	サーベント液
Cu+Ni	-	-	Cu 8-10 Ni 5-10	-
Cu+Cr	-	-	Cu 10 Cr 10-20	-

5-3 実験方法

試験前に試験片とパッドは、超音波洗浄機を用いアセトンで洗浄した。

試験は、大気中で行ない温度・湿度の制御は行なわなかった。

試験片を試験機に取り付け、あらかじめ引張応力 $[20.8 \text{ kg/mm}^2 (204 \text{ MPa})]$ を与える。この応力は、試験片の弾性限界応力の $1/2$ 以下の値である。

それから正弦波形の所定の繰返し引張応力を加える。

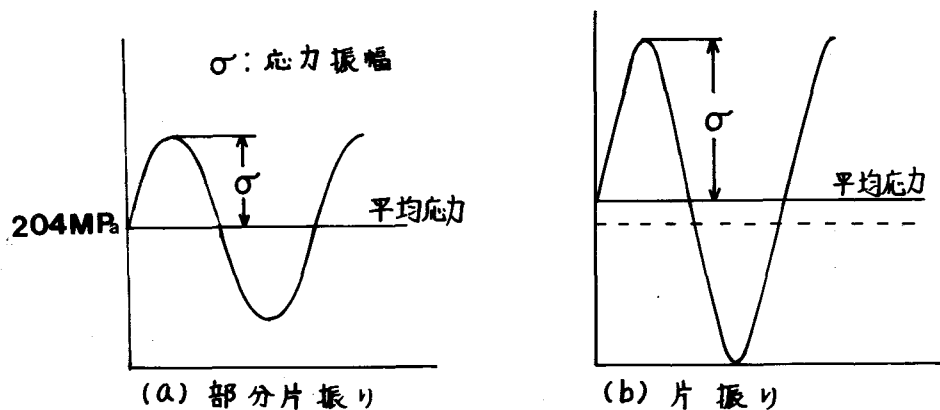


図 5-7 繰返し引張荷重

繰返し応力は、部分片振り(図5-7-(a))とし、 σ が応力振幅(STRESS AMPLITUDE)である。なお応力振幅が 204 MPa を超えるときは、図5-7-(b)のような片振り応力とした。

接触荷重は、接触面が摩耗するにつれて低下するので、適宜 フルーヒングリングのボルトを締め直して常に所定の値を保った。

周波数は、フレッチングの特性を調べるときには変化させたが、フレッチング疲労試験では 30 Hz とした。

試験は、試験片が破断するまで、または 10^7 回まで連続して フレッチングを与えた。

6 章 結果と考察

6-1 摩擦力・すべり振幅の波形

試験片に加わる繰返し応力は、正弦波である。
繰返し応力の振幅が小さくて接触面に巨視的
すべりが無い場合は、摩擦力・相対すべりの波形
は共に正弦波形状となる。その様子を図 6-1-1
に示す。

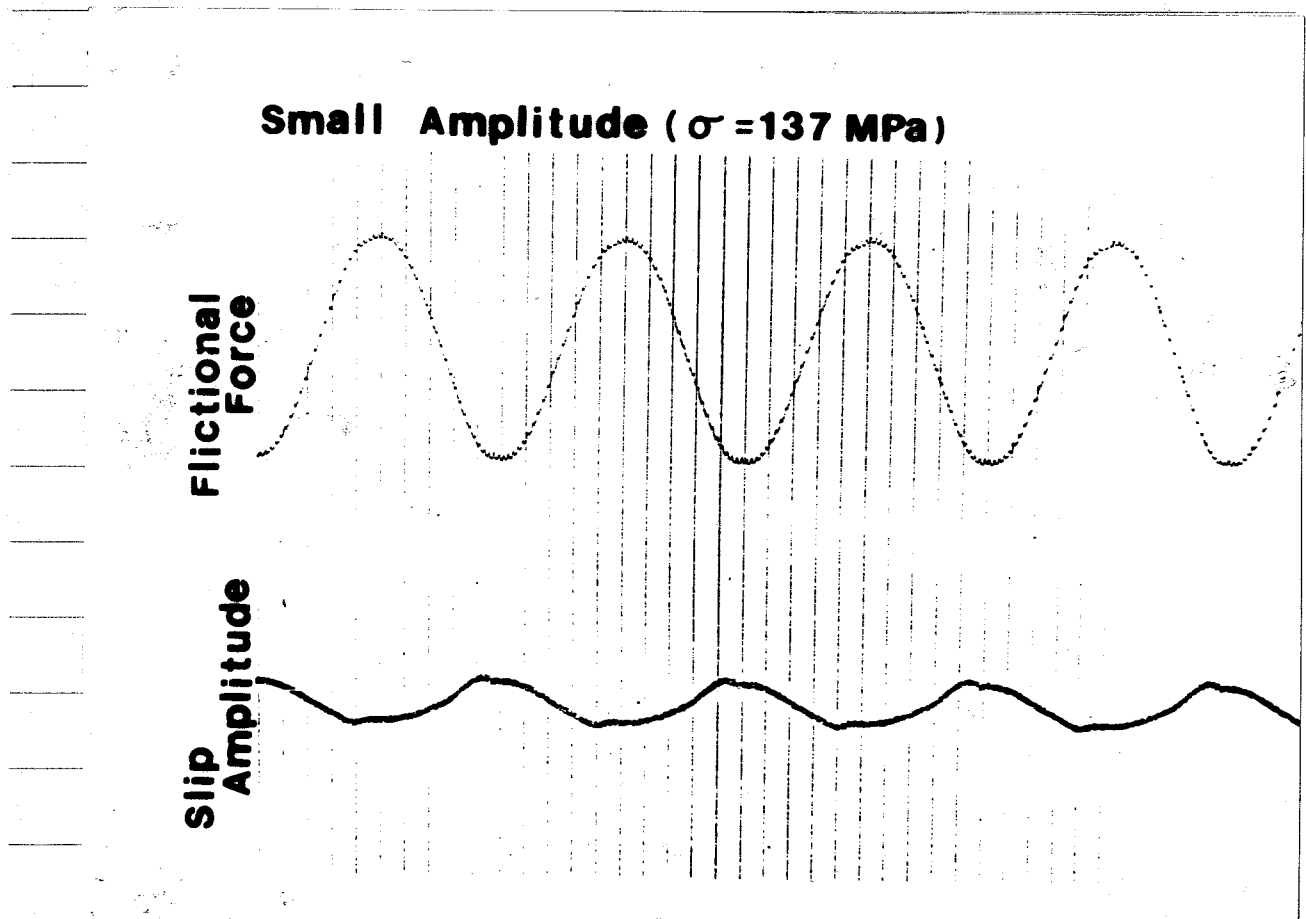


図 6-1-1 応力振幅が小さいときの 摩擦力・すべり振幅の波形

応力振幅が大きいときは、接触面に巨視的すべりを生じ、摩擦力・相対すべりの波形は図6-1-2のようになる。

試験装置の試験片とパッドとの相対的位置は、図6-1-3のようになっている。

以下図6-1-2と図6-1-3について説明する。

- ① 今試験片に下向きの力が加わり、試験片が下方に伸びるとする。パッドには静摩擦力が働き、この力と板バネの変形による力とがつり合う所まで下方へ移動する。(図6-1-3〔Ⅱ〕O₁)

このとき板バネのひずみゲージは大きく変形し、その出力が摩擦力として図6-1-2 \overline{OA} として記録される。

パッドと試験片の相対的位置は変わらないので、変位は一定 \overline{oa} となる。

- ② さらに試験片に加わる力が大きくなると、パッドの位置はそのまま、試験片だけが下方に移動する。(図6-1-3〔Ⅲ〕O₂)

このとき摩擦力はほぼ一定 (\overline{AB}) の値を示すが、変位は急激に変化する (\overline{ab})

このとき記録される摩擦力と変位の波形から接触面ではスティックスリップを生じているものと思わ

れる。

- ③ 試験片に作用する力が反対方向になると、静摩擦力によりパッドと試験片の相対位置は変わらないまま上方へ移動するので、変位が一定(\overline{bc})の状態では摩擦力が反対方向へ大きく変化する。 (\overline{BC})

以上の状態を繰り返す。

図 6-1-2 の \overline{AB} は、本来一定となるはずであるが、接触面の状態、酸化摩耗粉の作用によりサイクル毎に微妙に変化する。

また変位の曲線で \overline{oa} と \overline{bd} とは平行になるはずであるが \overline{bd} が変化している。これは板バネの引張方向と圧縮方向の剛性がわずかに異なるためであろう。

フレッチングでは、相対すべりの変化量を一般にすべり振幅 (SLIP AMPLITUDE) と呼ぶので、今後はそれを使用する。

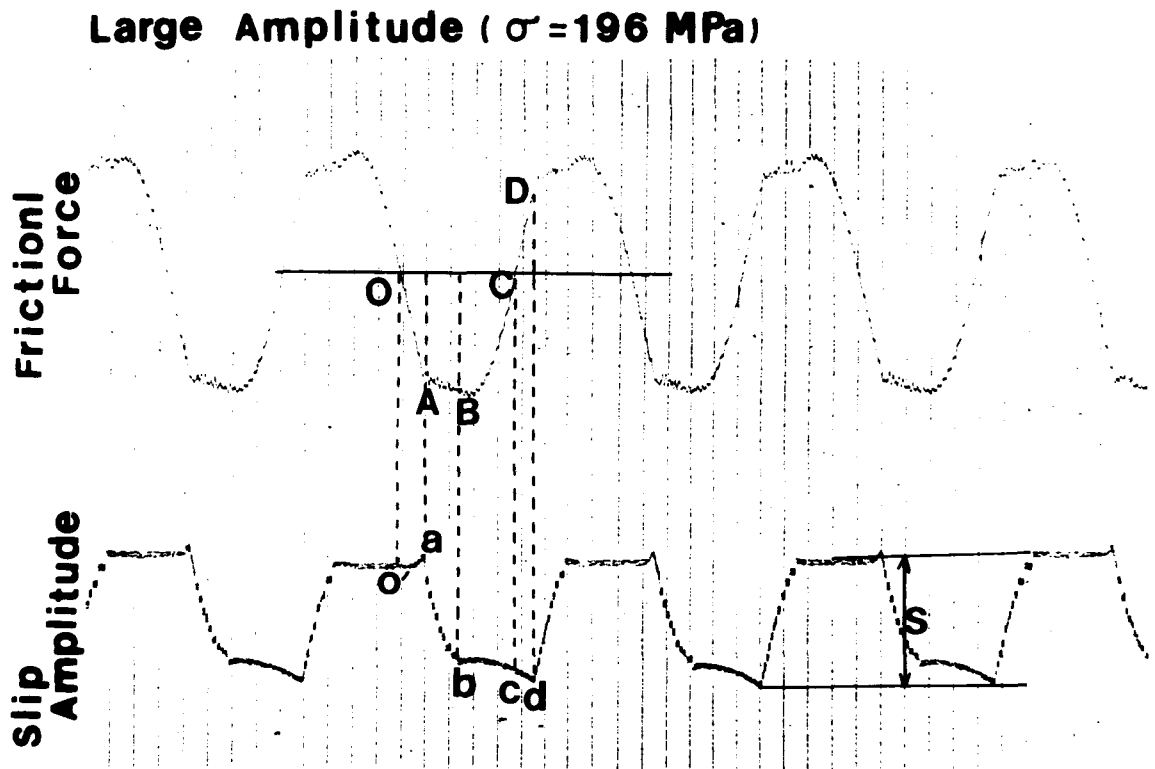


図 6-1-2 応力振幅が大きいときの摩擦・すべり振幅の波形

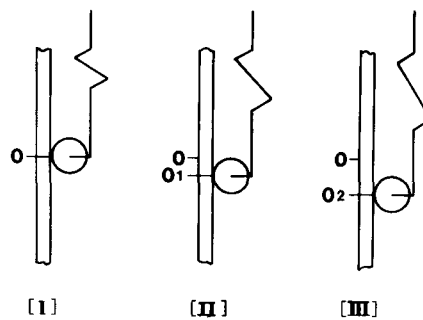


図 6-1-3 試験片とパッドの相対位置

6-2 摩擦係数とすべり振幅の変化

パッド材に S45C を用いて、繰返し数に伴い摩擦係数とすべり振幅の変化する様子を示したものが図 6-2-1 と図 6-2-2 である。

図 6-2-1 は応力振幅が大きく [$176 \text{ MPa} (18 \text{ kg/mm}^2)$] すべり振幅も大きいときのもので、図 6-2-2 は応力振幅が小さく [$137 \text{ MPa} (14 \text{ kg/mm}^2)$] すべり振幅の小さいときのものである。それぞれ接触荷重が高いとき [$65.3 \text{ N/mm} (6.66 \text{ kg/mm})$] と低いとき [$43.6 \text{ N/mm} (4.44 \text{ kg/mm})$] についてのものである。

応力振幅が大きく、接触荷重が高いとき(図 6-2-1)は、摩擦係数は初期に顕著なピークを示し、その後序々に一定となる。すべり振幅は、摩擦係数が最大のときに最小値を示した後次第に増加する。

これに対して接触荷重が低いときは、摩擦係数の変動は少なく、すべり振幅も大きな値でほぼ一定となる。

応力振幅が小さいときは(図 6-2-2)、接触荷重の大小にかかわらず摩擦係数、すべり振幅ともに変動が少なく、フレッチング回数が多くなるにつれて摩擦係数は低下しすべり振幅は

次第に大きくなる。

摩擦係数が初期に上昇するのは、接触面の微小突起が降伏し表面の自然酸化膜が破壊され、金属接触する領域が次第に多くなり凝着を生ずるためと思われる。ヒークを示した後摩擦係数が序々に低下するのは、発生した酸化摩耗粉のいわば潤滑作用によるもので、すべり振幅が大きいほど摩耗量が大きく酸化摩耗粉の量が多いため潤滑効果が大と考えられる。

応力振幅が小さくすべり振幅がある値以下では、接触面内に固着部があり弾性的に振動しているため、初期には摩擦係数の低下は見られないが、フレッチング回数が多くなると、固着部にも摩耗粉が発生し摩擦係数は低下しすべり振幅も大きくなる。

図6-2-3は、パッド材にSK5を用いて同様な条件での試験結果を示す。

図6-2-1と比較するとS45Cパッドのときに見られた初期の摩擦係数のヒークは明瞭ではない。これは、同種材料のフレッチングのときに凝着が激しく、パッドが硬くなると凝着は少なくなるというWaterhouse⁵⁾の結果と一致する。

SK5材のパッドでは、その硬度のために凝着部の成長が抑制されて、その結果摩擦係数のヒーク

が低いものと思われる。

また、すべり振幅は全体的に S45C のときより低い値となっている。これは、SK5 材のパッドは硬く耐摩耗性にすぐれているため、フレッチング作用を受けても接触幅の変化が少なく、接触圧力の低下が少ないためと考えられる。

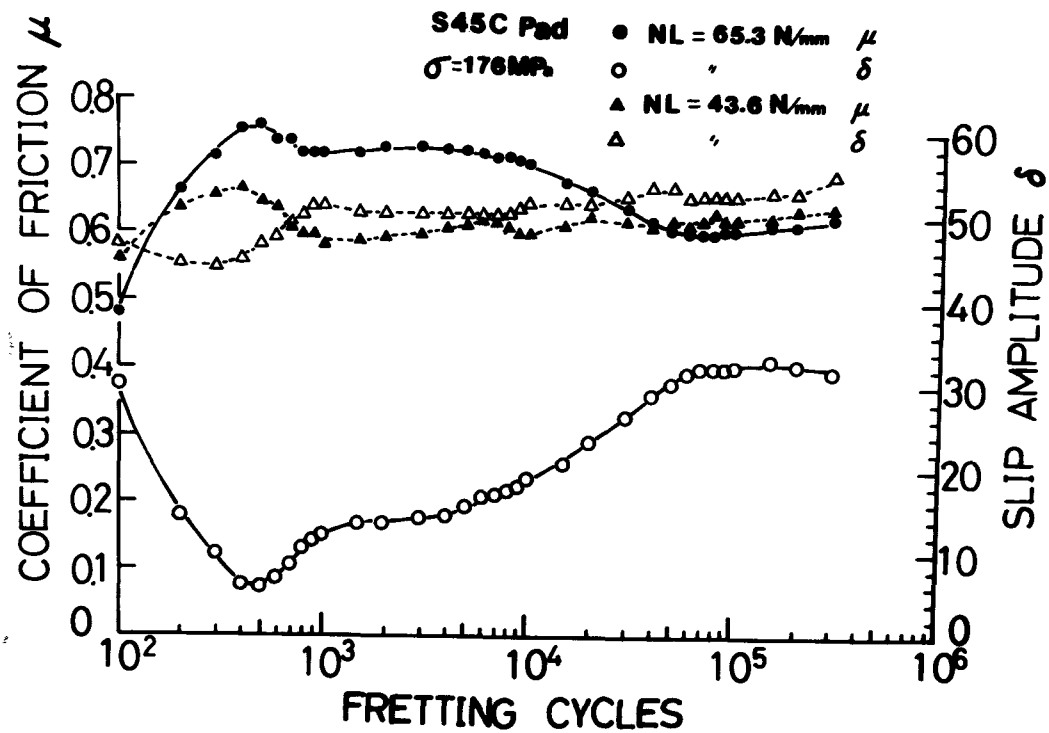


図 6-2-1 摩擦係数・すべり振幅の変化 (応力振幅の大きいとき)
 S45C パッド

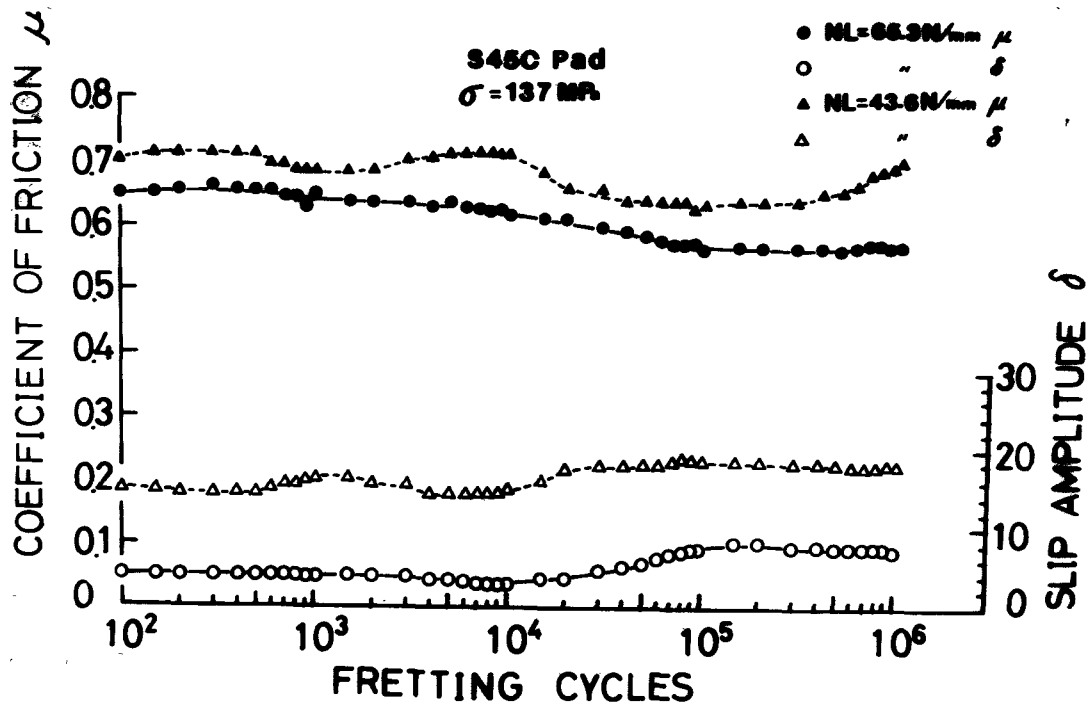
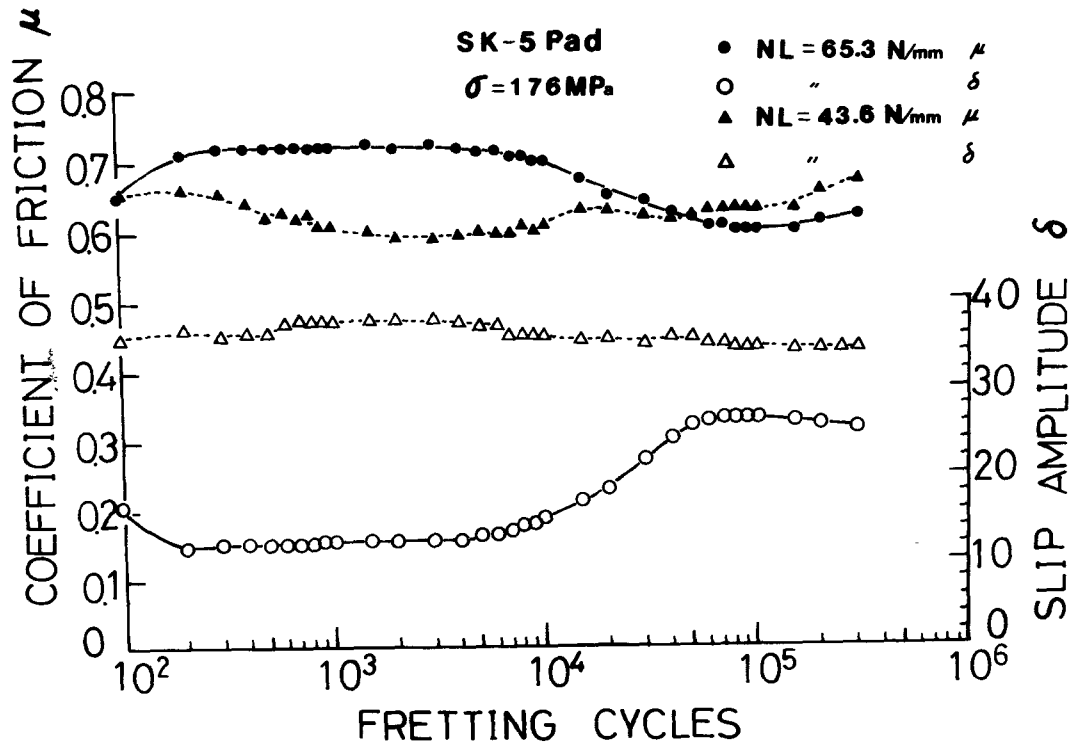
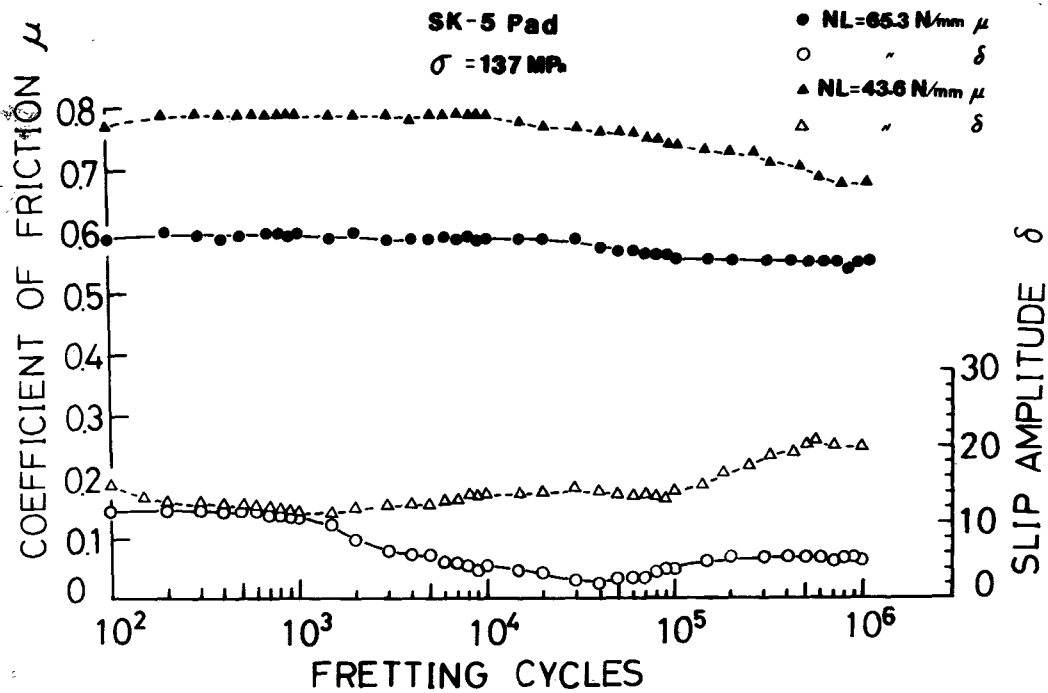


図 6-2-2 摩擦係数・すべり振幅の変化 (応力振幅の小さいとき)
 S45C パッド



6-2-3 摩擦係数・すべり振幅の変化(応力振幅の大きいとき) SK5パッド



6-2-4 摩擦係数すべり振幅の変化(応力振幅の小さいとき) SK5パッド

6-3 摩擦係数とすべり振幅

パッド材として SK5 を用いて、応力振幅を変化させたとき、摩擦係数とすべり振幅との関係を示したのが図 6-3-1 である。

摩擦係数は、すべり振幅が小さいとき（応力振幅は小さい）に立ち上がりか急で、その後序々に増加し一定値に近づく。

接触荷重を高くするにつれて立ち上がりの傾きが小さくなる。

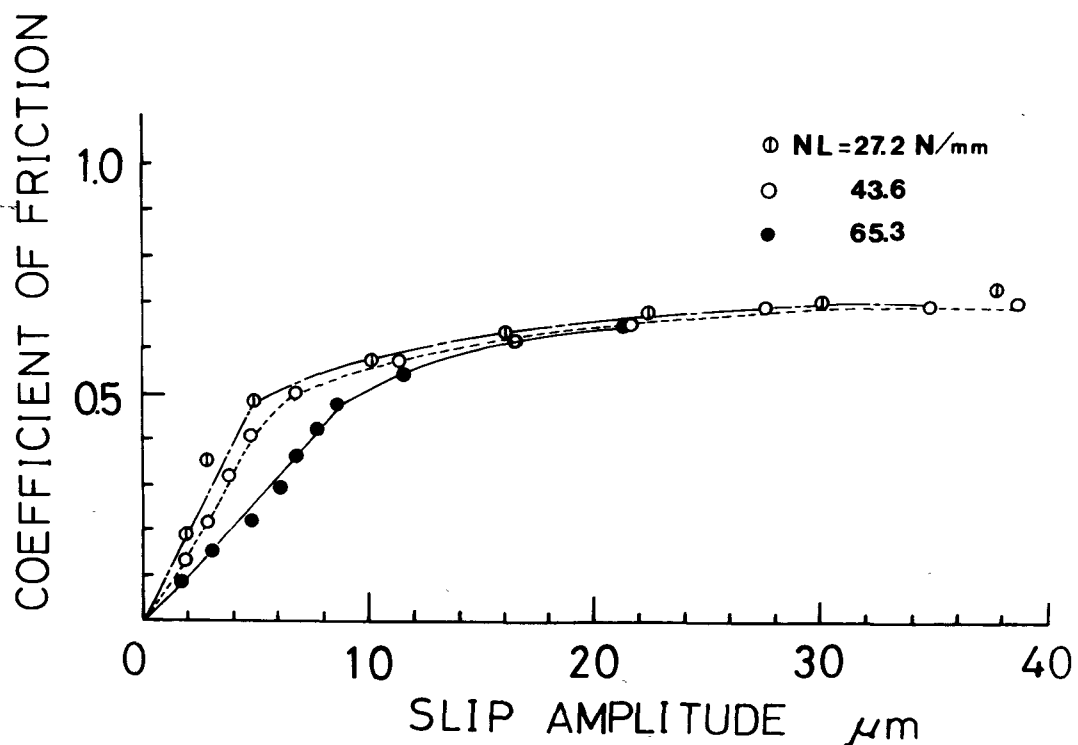


図 6-3-1 摩擦係数とすべり振幅

図 6-3-2 は、応力振幅を変化させたとき
すべり振幅の変化を示したものである。

パラメータは 接触荷重である。

この図で傾きが著しく変化する所が巨視的
すべりを生じる点である。

接触荷重が低いときは、小さな応力振幅で
巨視的すべりを生ずるが、接触荷重が高くなる
と巨視的すべりを生ずる応力振幅も大きくなる。

この巨視的すべりを生ずる臨界値は、接触
荷重に比例しており、試験装置のブリッジの
板バネの剛性に依存するものである。

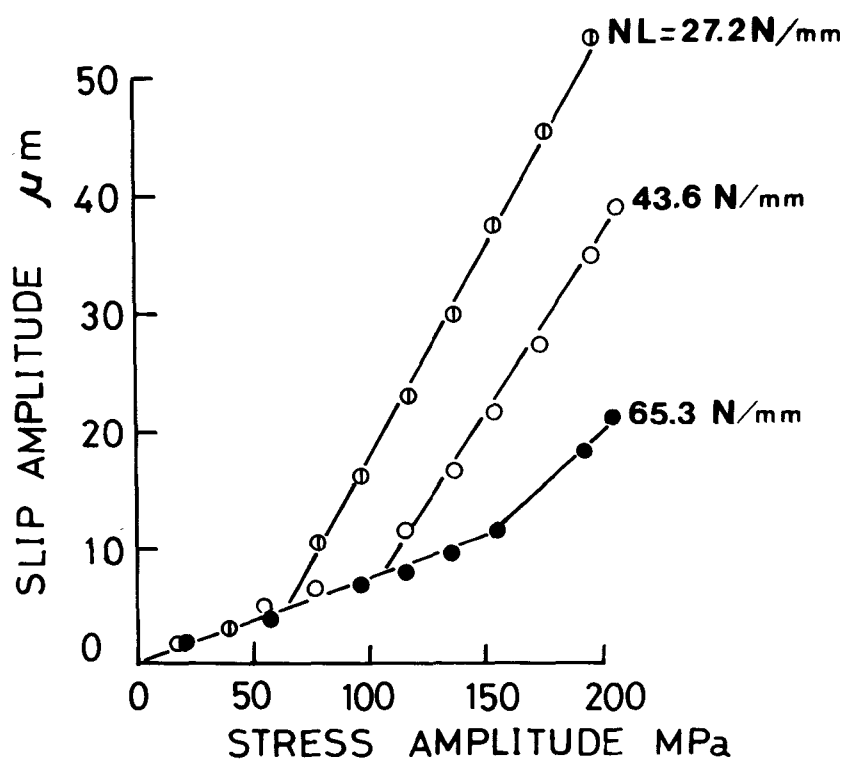


図 6-3-2 応力振幅とすべり振幅

6-4 接触部の損傷状況

フレッチング回数が増加するにつれて、試験片およびパッドの接触部は摩耗する。

このとき接触部付近には、ココアと呼ばれるフレッチング特有の赤褐色の酸化摩耗粉が見られる。

図6-4-1は、SK5のパッドを用い、接触荷重 65.3 N/mm (6.66 kg/mm)、応力振幅 $\sigma = 156.8 \text{ MPa}$ (16 kg/mm^2) のときに、フレッチング損傷の大きさ(幅)が繰返し数とともに変化する様子を示したものである。はじめの点は、ヘルツの理論から求めた値である。

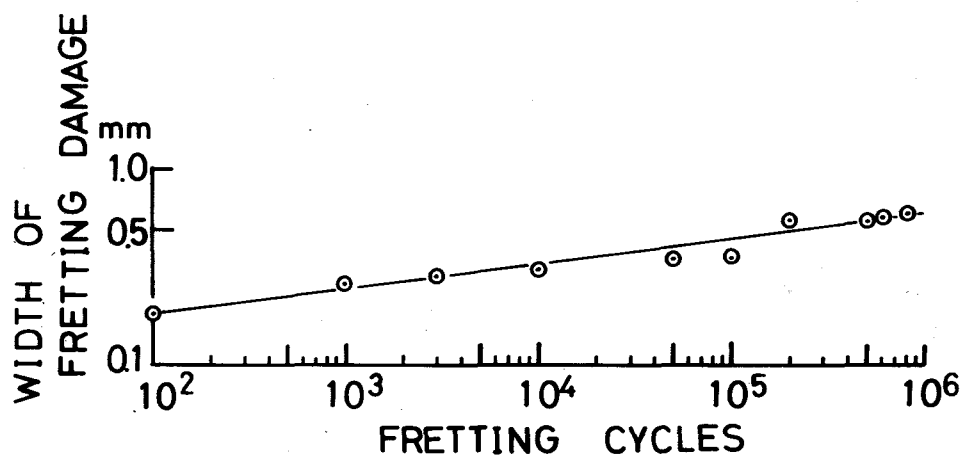


図6-4-1 フレッチング回数に対するパッド(SK5)の損傷幅の変化

板試験片の損傷部の形状は、接触荷重や応力振幅により大きく変化する。表面あらさ計を用いて計測したときの結果を図6-4-3に示す。
(いずれもパッドはSK5を使用した)

以下各条件下の損傷の特徴をのべる。

A. 応力振幅が小さく[$\sigma = 137 \text{ MPa} (14 \text{ kg/mm}^2)$]
接触荷重が高いとき[$65.3 \text{ N/mm} (6.66 \text{ kg/mm})$]
損傷は少なく凝着のため元の平面より盛り上がりが見られる。

B. 応力振幅が小さく[$\sigma = 137 \text{ MPa} (14 \text{ kg/mm}^2)$]
接触荷重が低いとき[$43.6 \text{ N/mm} (4.44 \text{ kg/mm})$]
繰返し数が多くなると巨視的すべりを生じるため摩耗が発生する。

しかし、深さ方向への損傷の進展は少ない。

C. 応力振幅が大きく[$\sigma = 186 \text{ MPa} (19 \text{ kg/mm}^2)$]
接触荷重が高いとき[$65.3 \text{ N/mm} (6.66 \text{ kg/mm}^2)$]
損傷はピット状に深く進行する。

D. 応力振幅が大きく[$\sigma = 176 \text{ MPa} (18 \text{ kg/mm}^2)$]
接触荷重が低いとき[$43.6 \text{ N/mm} (4.44 \text{ kg/mm})$]

すべり振幅が大きくなり、摩耗が増大して、損傷面積の拡大とともに深さ方向への進行も著しい。

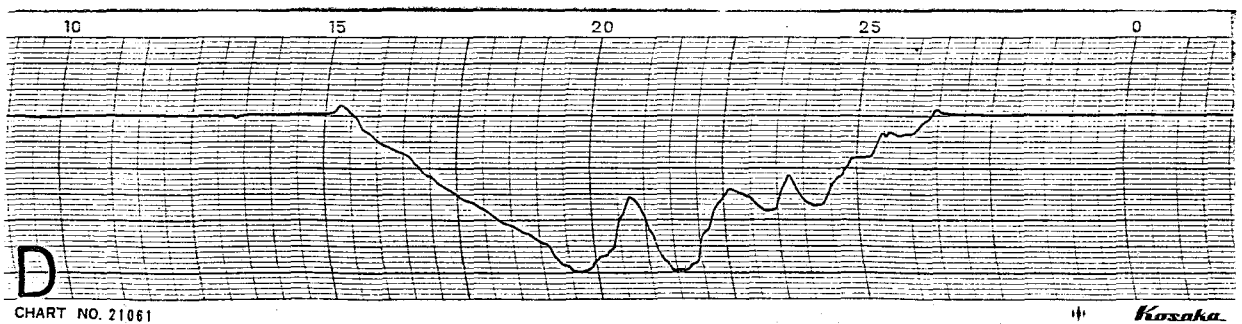
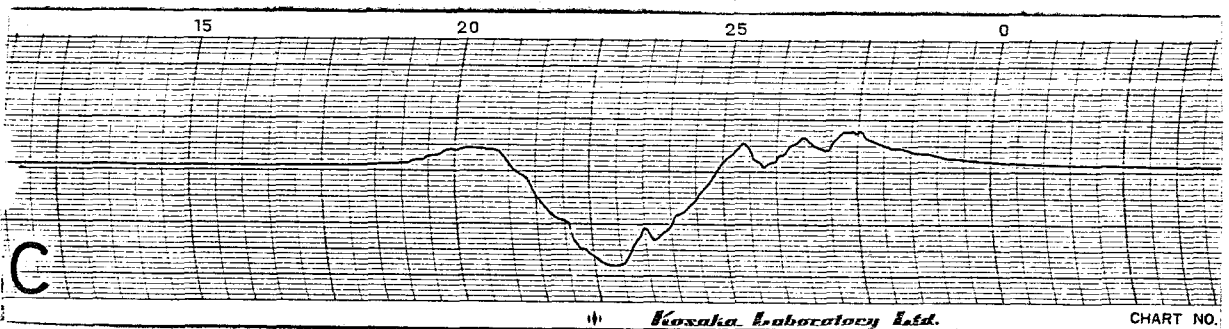
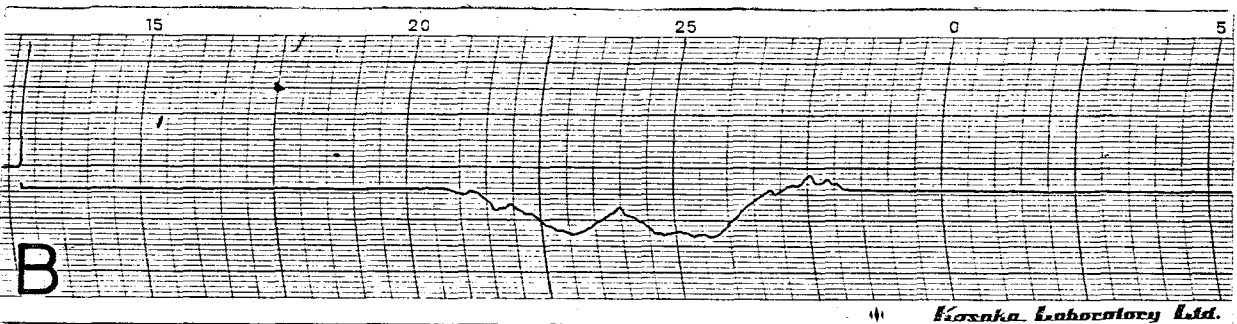
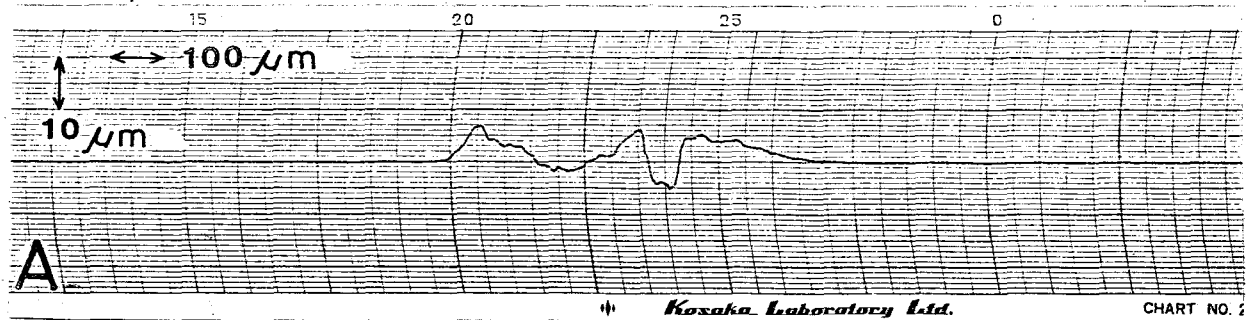


図 6-4-3 板試験片の損傷部の形状

6-5 繰返し速度の影響

試験条件を一定〔パッド材 SK5, 接触荷重 65.3 N/mm (6.66 kg/mm), 応力振幅 176 MPa (18 kg/mm^2)〕にして振動数を変化させたときの摩擦係数の変化を示したのが図 6-5-1 である。

初期に摩擦係数がヒークを示すのは、前述のとおりであるが、振動数が高いと単位時間当りの摩擦仕事が増し、表面温度が高くなると考えられる。従って、雰囲気による酸化と材料の機械的性質の変化ならびに摩耗粉の摩擦面への付着の難易が摩擦に影響すると考えられる。

摩擦係数が定常値に達するまでの挙動が振動数によって異なるのは、上記原因の総合的結果とみなされる「摩擦面の変質」の進行速度が摩擦条件によって異なるためと考えられる。

図 6-5-2 は、同じ試験片に 10^4 回程 フレッチング 損傷を与えた後、そのまま振動数のみを変化させて摩擦力とすべり振幅を記録したものである。

この図から摩擦面の変質が定常状態に達したものは、振動数を変えても摩擦力・すべり振幅に変化はなく、上記の考えを裏付けている。

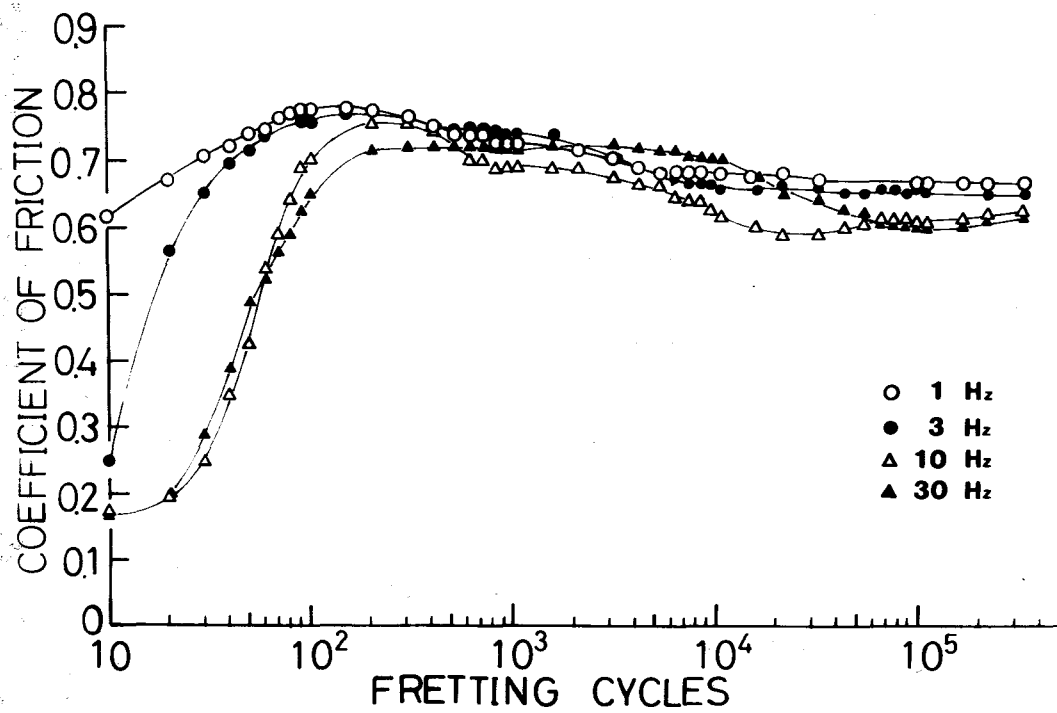


図 6-5-1 振動数を変えたときの摩擦係数の変化

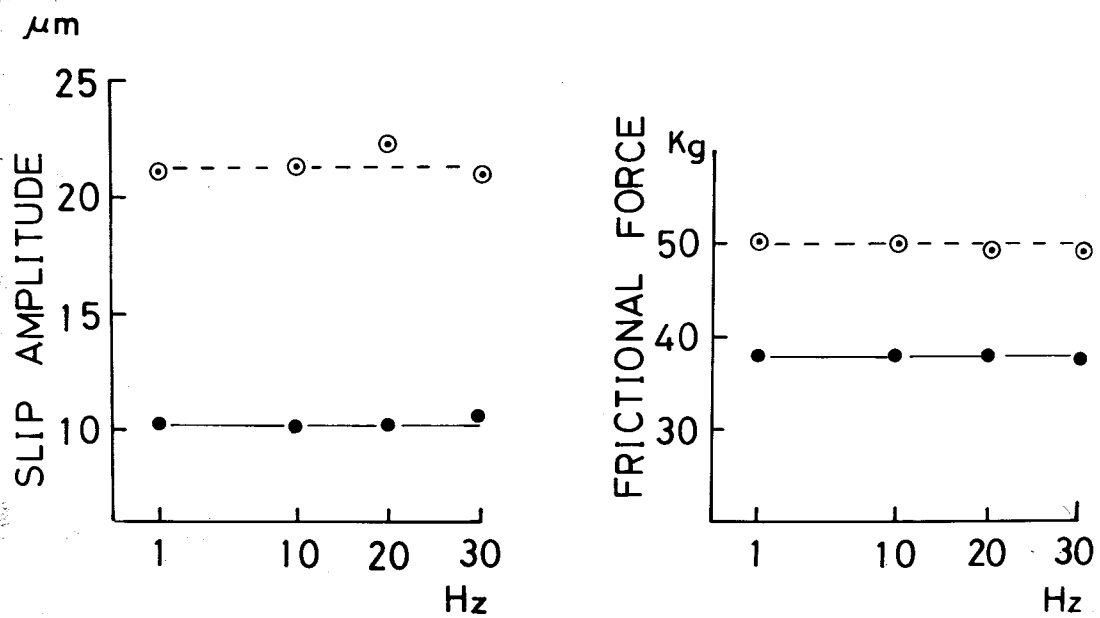


図 6-5-2 10^4 回 フレッチング損傷を与えた後、振動数のみを変化させたときの すべり振幅 と 摩擦力 の変化

6-6 き裂の発生と進行

4章でみたように接触面には、垂直力と接線力（摩擦力）とが作用するが応力の変化が最も激しいのは表面上である。

図4-13の σ_x では、パッドが右方向に動くとき原点の右側で最大 $1.72p_0$ の圧縮応力、左側では $1.4p_0$ の引張応力が作用する。そして反対方向に動くときはそれらが逆転するため

$$1.72p_0 + 1.4p_0 = 3.12p_0$$

の範囲で変動を繰返すことになる。このため表面でき裂が最も発生しやすい。

σ_x に垂直方向と主応力の σ_1 に垂直方向とのなす角を θ としてプロットしたのが図4-20である。主応力に直角な方向は、接触面中央に向って傾斜しておりその傾斜角は中央へ近づくほど大きい。

き裂が主応力に対して直角方向に進展するとすれば、表面に対して斜めに進展するものと考えられる。

接触部付近は、垂直力と接線力との影響が大きいが、接触部付近から離れると、これらによる応力は深さとともに急激に低下する。

従って、表面から離れた所ではき裂は試験片に加わる変動引張力により進行する。き裂は

内部では表面に対して直角になるものと考えられる。

図 6-6-1 は、応力振幅 176 MPa (18 kg/mm^2)
垂直荷重 65.3 N/mm (6.66 kg/mm) で 3.0×10^5 回
フレッチングを与え損傷部を切断したものである。

表面付近には、表面に対して約 45° の角度に
微小なき裂が見られる。

図 6-6-2 は、同様な条件で 3.0×10^5 回フレッチング
を与えた後、ハッドを取外し 3.0×10^5 回繰返し
応力のみ与えたときの損傷部の断面を示す。

き裂は大きく進行している。またその角度
は表面に対してしだいに垂直に近づいている。

以上からフレッチング疲労ではき裂は表面
から発生し、繰返し応力によって進行する性質のもの
であることが認められる。

このようなき裂の発生する時期について、遠藤
後藤¹⁴⁾らによれば、フレッチングによる被害はフレッチ
ング疲労寿命の約 25% の繰返し数で飽和し、
その後はフレッチングの有無にかかわらず、全寿命
は一定となると報告されている。

試験片がフレッチング疲労によって破断する直前に試験装置から取外した状態を図6-6-3に示す。

試験片表面はフレッチングによる大きな摩耗跡が見られるが、き裂は損傷部の中心に近い所に見られる。

これより破断に至るき裂が発生するのは、摩耗が進行する以前の比較的初期であることが推察される。

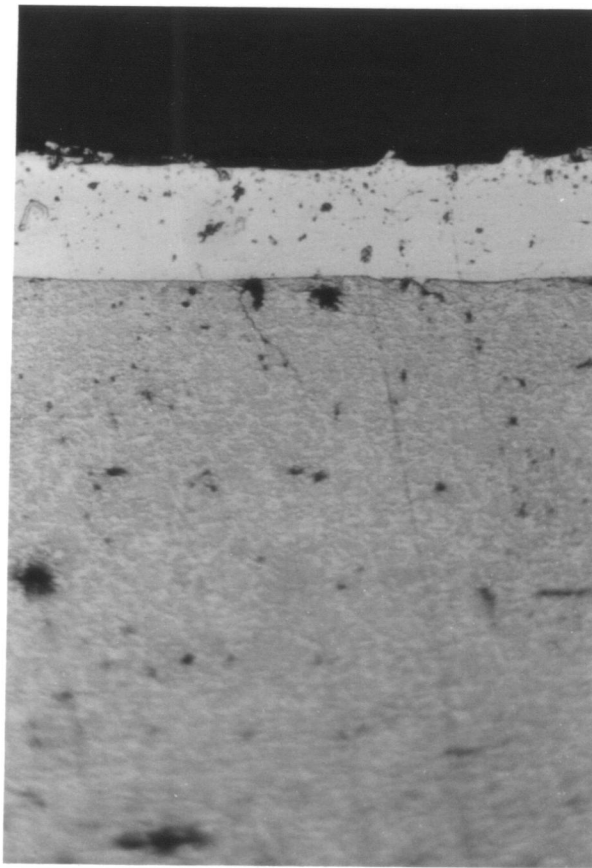


図 6-6-1

3.0×10^5 回フレッキングを与えた
後の断面 $\times 300$

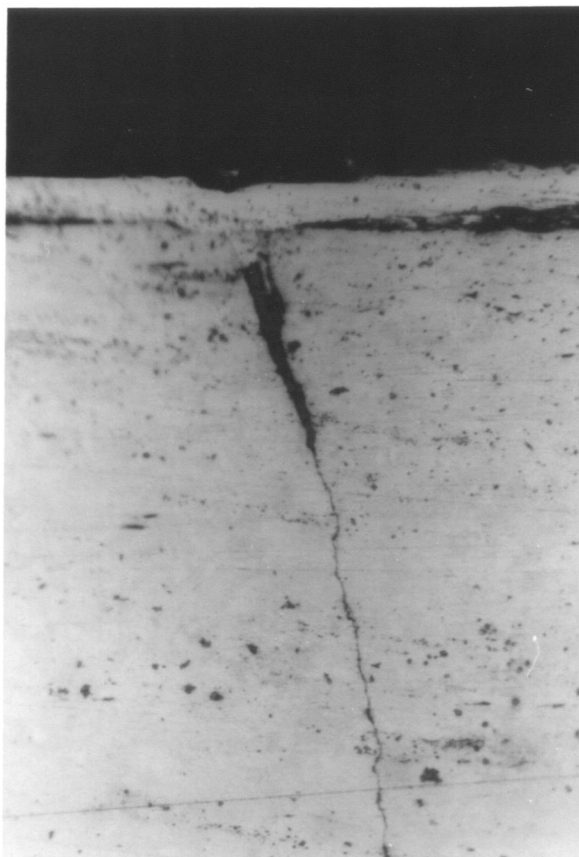
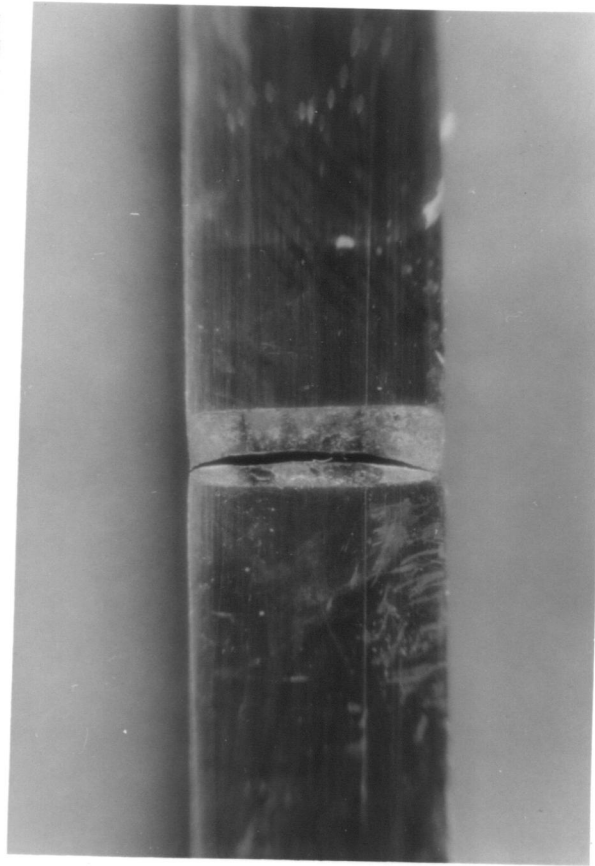


図 6-6-2

3.0×10^5 回フレッキングを与えた後
さらに 3.0×10^5 回繰返し応力のみ
与えた後の断面 $\times 300$



6-6-3 フレッチング疲労により発生したき裂

6-7 フレッチング疲労曲線

S45C パッドを用い接触荷重を変えたときのフレッチング疲労試験の結果を図6-7-1に示す。フレッチングを与えないときは、明らかに疲労限が存在するか、フレッチングを伴うときは疲労限は認められなくなる。また、疲労強度の低下は、応力振幅が小さいときに顕著である。

これらはフレッチング疲労の大きな特徴である。

接触荷重が高いときは、低いときに比べてフレッチング疲労強度の低下が著しい。

接触荷重が低いときは、応力振幅が大きいとフレッチング疲労強度とフレッチングなしの疲労強度との間に差はほとんど認められず、応力振幅が小さいとばらつきが大きい。

図6-7-2は、パッド材をSK5にしたときの結果である。

接触荷重はS45Cパッドのときと同様な条件で試験を行なったものであるが、接触荷重を変えてもフレッチング疲労寿命はほとんど変わらない。

応力振幅が小さいところで、接触荷重の低いほうが疲労寿命が短くなっている実験結果が

ある。これは、図6-2-4で見られるように接触荷重が高いときは、凝着した状態が長く続きすべり振幅がき裂発生の臨界値以下にあるためと思われる。しかし、フレッチング回数が増加するにつれて、接触面内にも摩耗粉が発生しすべり振幅も次第に大きくなり、き裂が発生して破断に至る。

図6-7-3と図6-7-4は、図6-7-1と図6-7-2を接触荷重についてプロットし直したものである。

これらの図から、接触荷重が高いときは、SK-5、S45CともSN曲線はほぼ一致することが分る。S45Cの接触荷重が低いときのSN曲線のみが他と異なっている。

この原因を調べるために、試験片がフレッチング疲労のために破断したときのパッドの損傷幅と応力振幅との関係を示したのが図6-7-5である。

接触荷重が高いときには、SK5、S45Cともほぼ同じ損傷幅となっている。

これに対して、接触荷重が低いときは両材料間に差が生じ、S45Cパッドの摩耗がSK5に比べて甚だ多く、損傷幅で約2倍の値を示している。

パッドの摩耗が多いと接触圧力の低下が

著しく、これがさらに相対すべりの増大を招くので、摩耗が一層促進される。この条件下では、摩耗の進行が疲れき裂の発生・進展を阻害するため、疲労寿命が増大するものと考えられる。

Waterhouse⁵⁾は冷間引抜鋼のフレッチングで試験片と同種材料のパッドを用いたときに凝着が激しく疲労寿命も短かく、パッドに硬い材質(0.56% C)を用いると凝着が緩和されてフレッチング疲労限が増加したと報告しているが、今回のパッド材にS45CとSK5を用いた実験結果からは、両者の間に顕著な差は見られなかった。

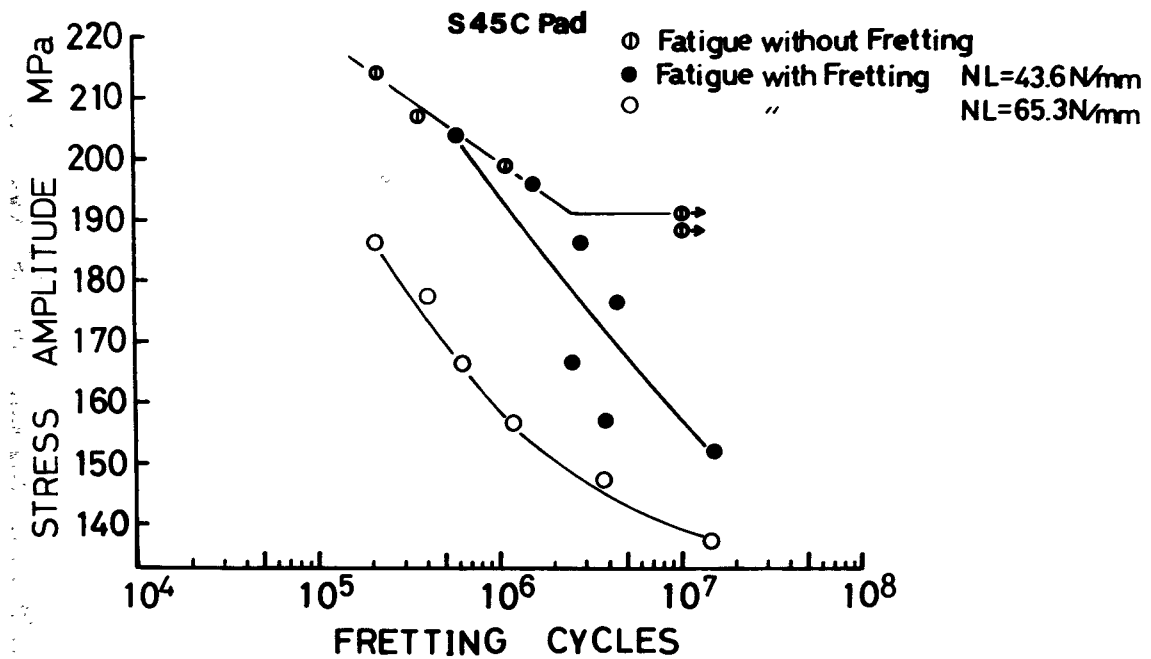


図 6-7-1 S45C パッドを用いたときのフレッチング疲労試験結果

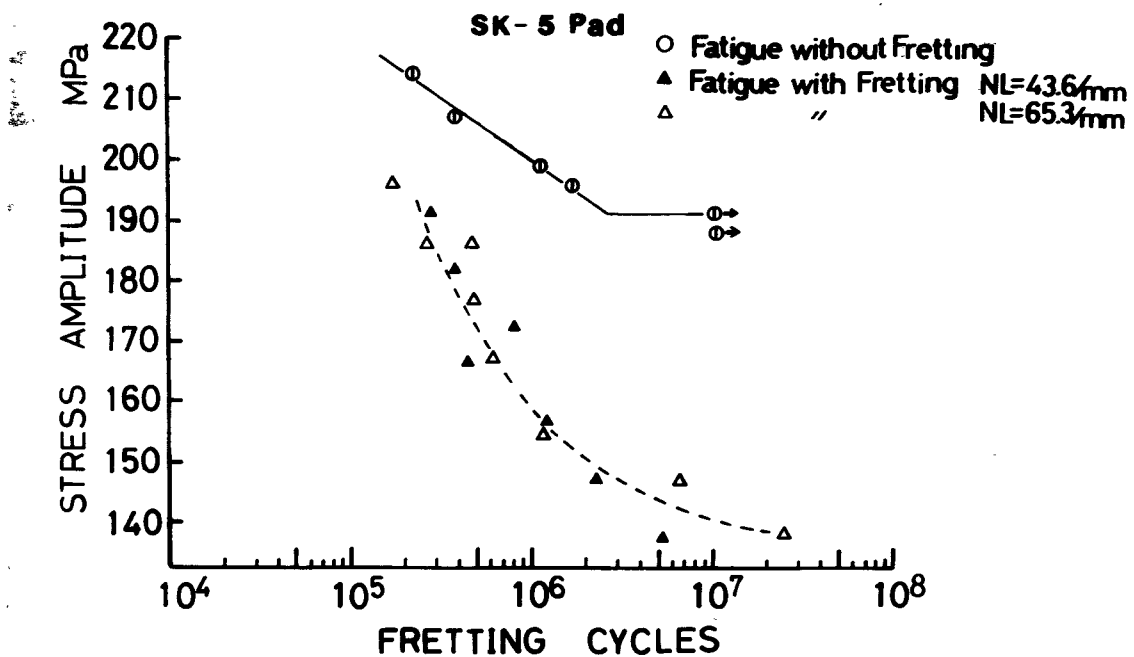


図 6-7-2 SK5 パッドを用いたときのフレッチング疲労試験結果

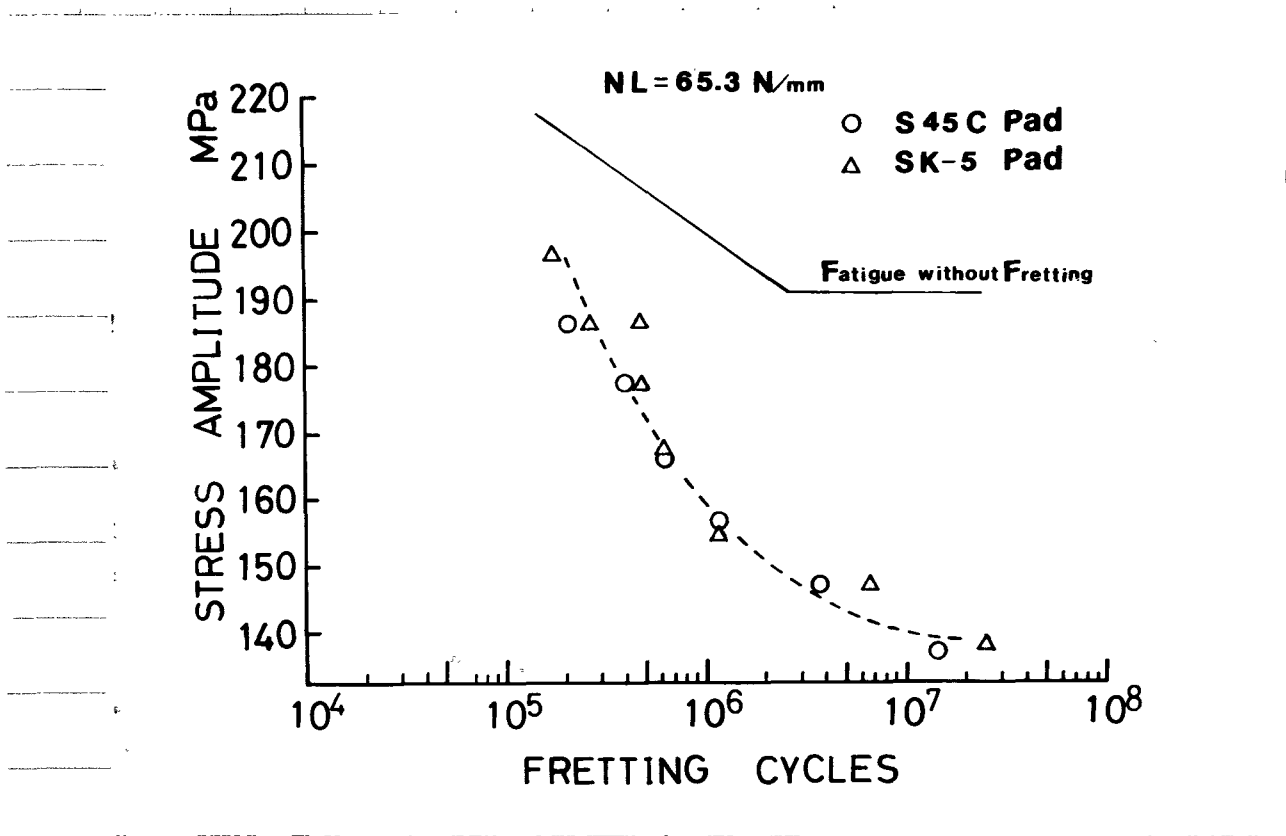


図 6-7-3

接触荷重が高いとき

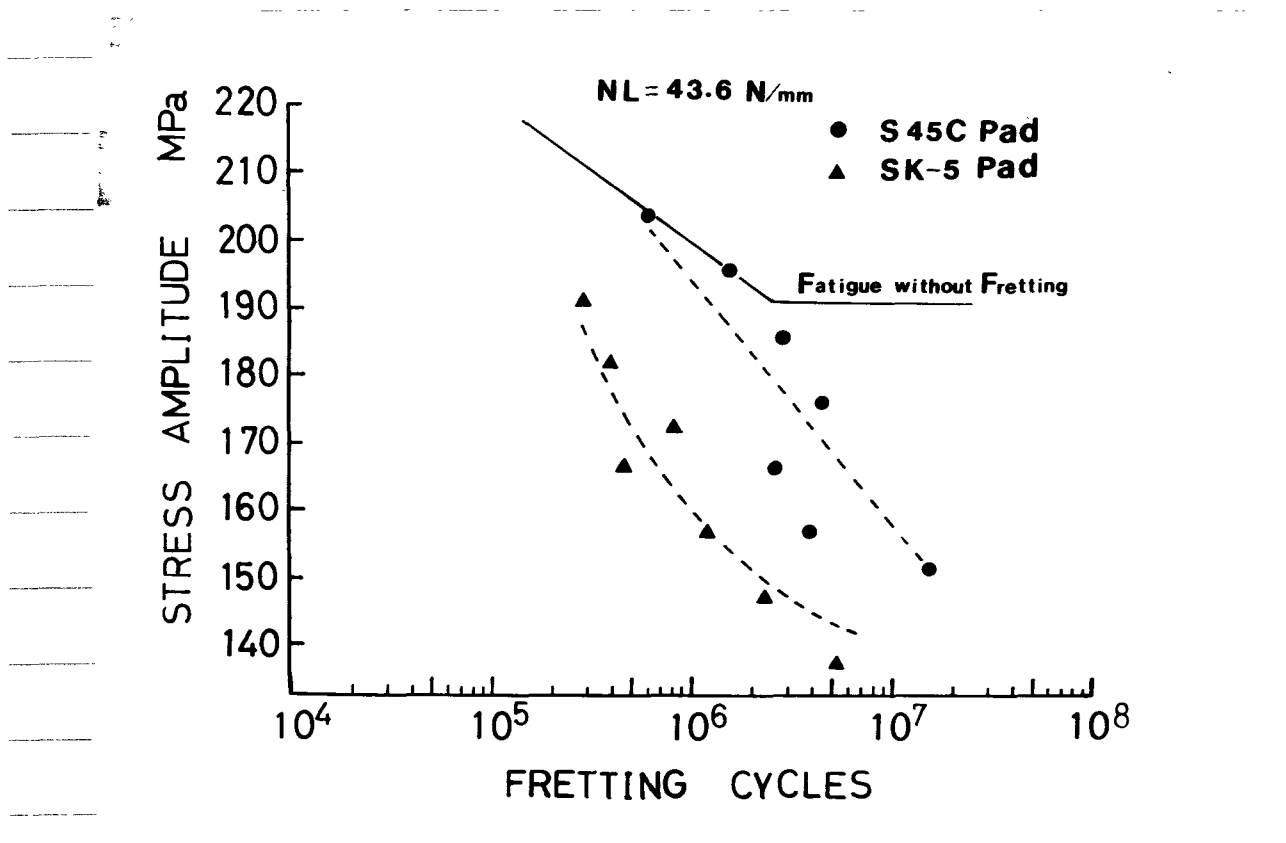


図 6-7-4

接触荷重が低いとき

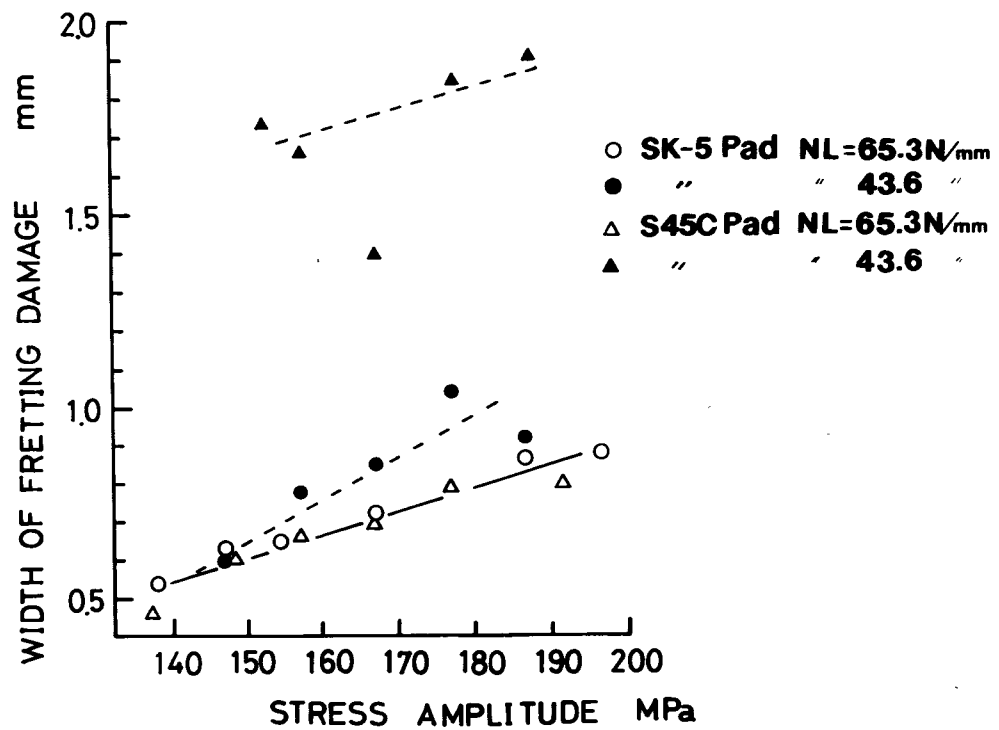


図 6-7-5 フレッチング疲労により試験片が破断したときの
パッドの損傷幅と応力振幅

6-8 形状効果

鋼の疲労に関する研究によれば、引張圧縮試験による疲労限には形状効果がほとんど認められないとされている³¹⁾。しかしフレッチング疲労については未だ不明のようで、この点を確認するために次の実験を行なった。

試験片には、図5-4のような薄形試験片を用い、その実験結果を図6-8-1に示す。同図には、同一条件下の正規試験片(4mm厚)の結果も併記した。

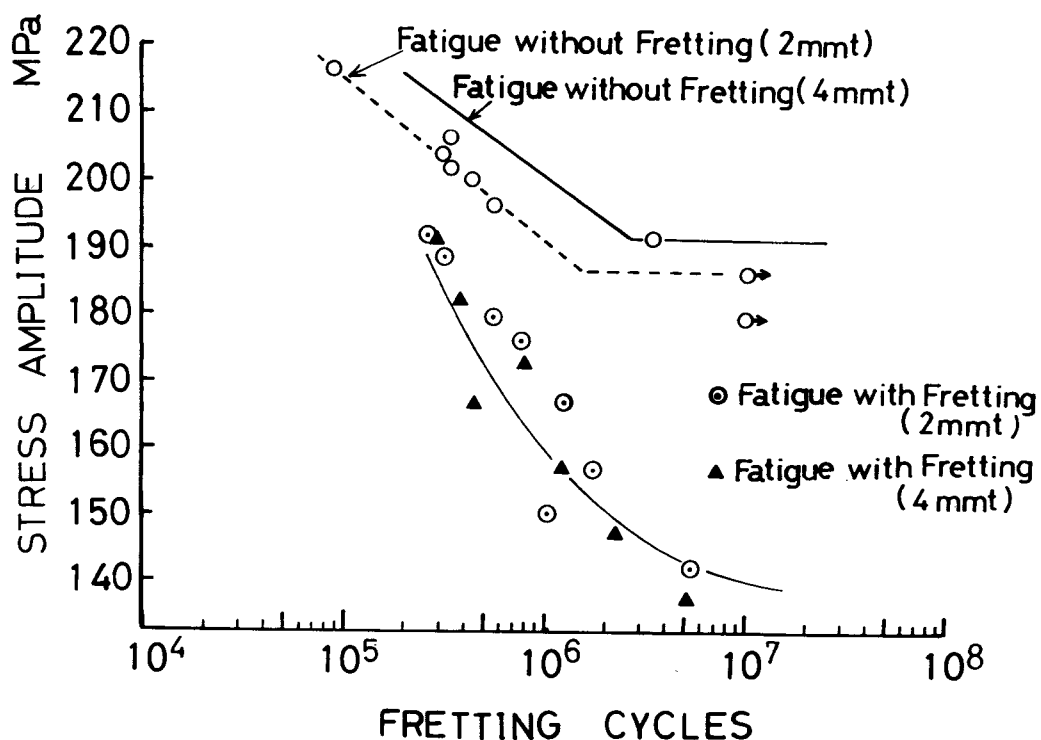


図 6-8-1 薄形試験片(2mmt)のフレッチング疲労試験結果

フレッチングなしの疲労曲線を比較すると、
2mm厚のものは4mm厚のものに比べ疲労限
が少し低下している。この原因については、
多くの2mm厚の試験片の疲労破断箇所が平行
部とR部の境界付近であったことからRの曲率
がやや小さかったための応力集中によるものと
思われる。従って、本質的な疲労限はほぼ
同一と判断される。

フレッチング疲労曲線は、2mm厚のものと4mm厚
のものとは類似しており、フレッチング疲労でも
板厚の影響はほとんど認められない。

フレッチングによって生じたき裂は、大きな応力
集中を招くので急速に進行すると考えられ、従って
形状(寸法)の影響がほとんど現われないと推定
される。

このことは、フレッチング疲労の対策として、表面
のき裂発生応力の向上とき裂の進展防止が
肝要であることを示唆している。

6-9 めっきの影響

フレッチング疲労防止の一方法として試験片にめっきを施し、その特性を調べた。

使用しためっきは、硬質めっきとして、クロム、ニッケルおよび銅(硫酸銅)、軟質めっきとしてカドミウム、銅(シアン化銅)、亜鉛および銀を用いた。

めっきは、試験片(S45C, 4mm厚)のフレッチングを受ける部分のみに限定して行ない、試験片の疲労限に本質的影響を与えないよう配慮した。なおパッド材はすべてSK5鋼を使用した。また、接触荷重、振動数はいずれも一定で、 65.3 N/mm (6.66 kg/mm), 30 Hz とした。

(1) 硬質めっき

クロム、ニッケルおよび銅(硫酸銅)めっき試験片の結果を図6-9-1に示す。

a. ニッケルめっき

ニッケルめっきを施したものは、疲労挙動が非常に低かった。これらの中にはフレッチング部以外のめっき皮膜にき裂が発生して応力集中を招き疲労限を低下させるものが認められた。図6-9-2は、フレッチング部から離れた所に生じためっき皮膜中のき裂である。

このき裂が鋼内部へ進展した状態を図6-9-3と図6-9-4に示す。

従来の研究によれば、ニッケルめっきについては効果があるという結果とその反対の結果があるが、今回の試験では明らかに後者であった。

その原因としてめっき皮膜の硬脆性が考えられる。一般にニッケルめっきの硬さは、150~500H_vで軟かいものは延性に富むか硬いものは脆弱であるといわれている。今回用いた試験片は、550H_vもありかなり硬い。従って静的強度は優れるが、動的強度とくに引張応力を繰返す疲労試験と接線力が振動的に作用するフレッチング試験に対しては、脆弱で耐性に乏しいと考えられる。

Lee と Jones²²⁾ がスルファミン酸浴から得られる比較的軟かいニッケルめっきのときに疲労強度の改善に成功しているので、今後この点の検討が必要である。

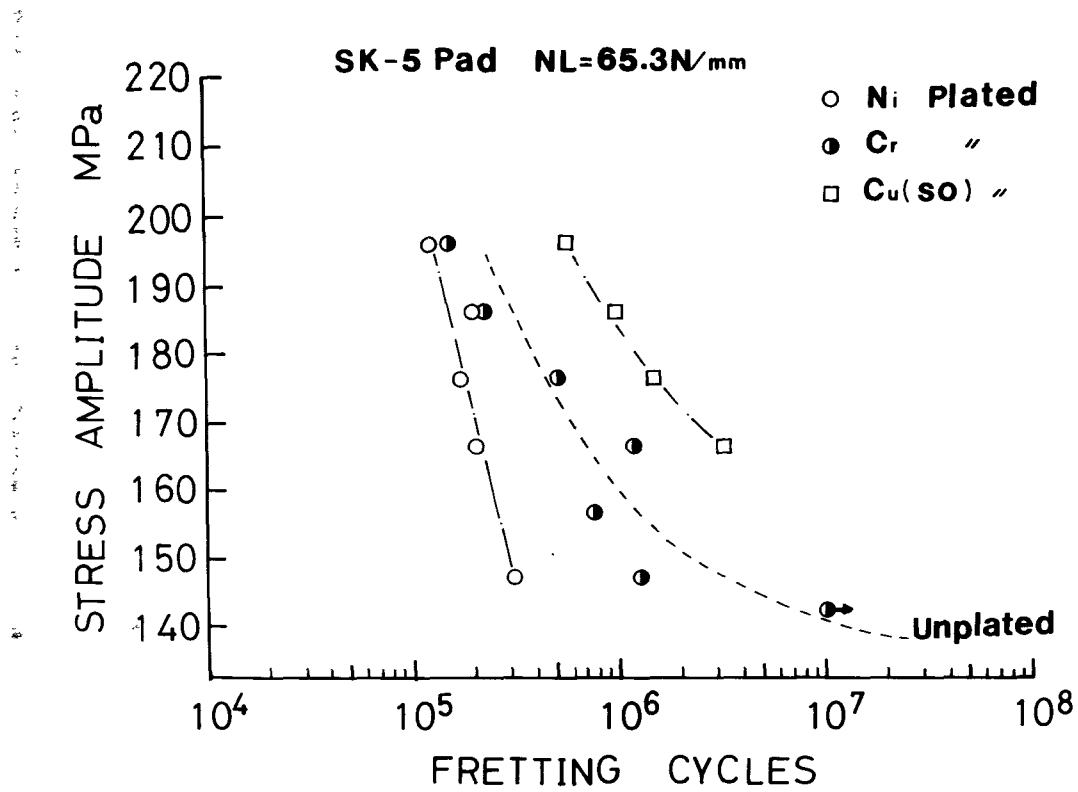
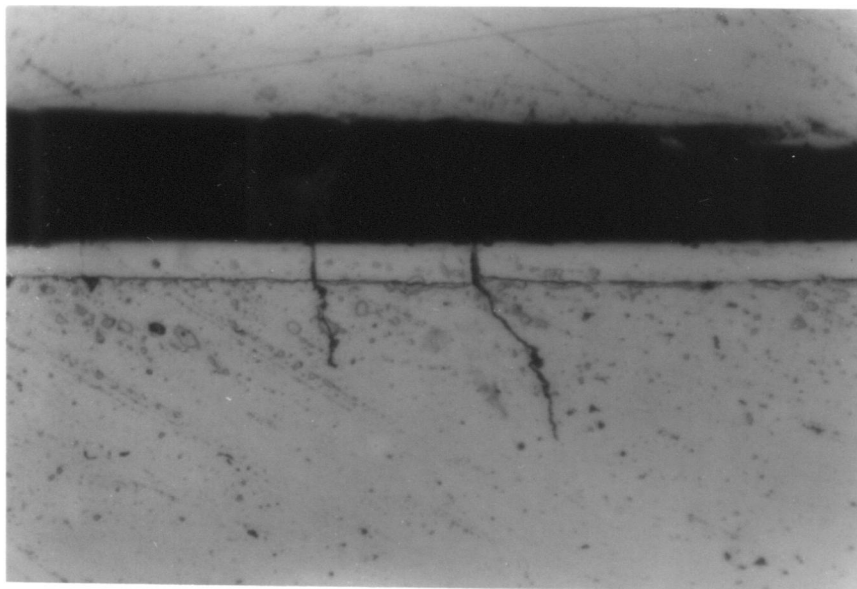
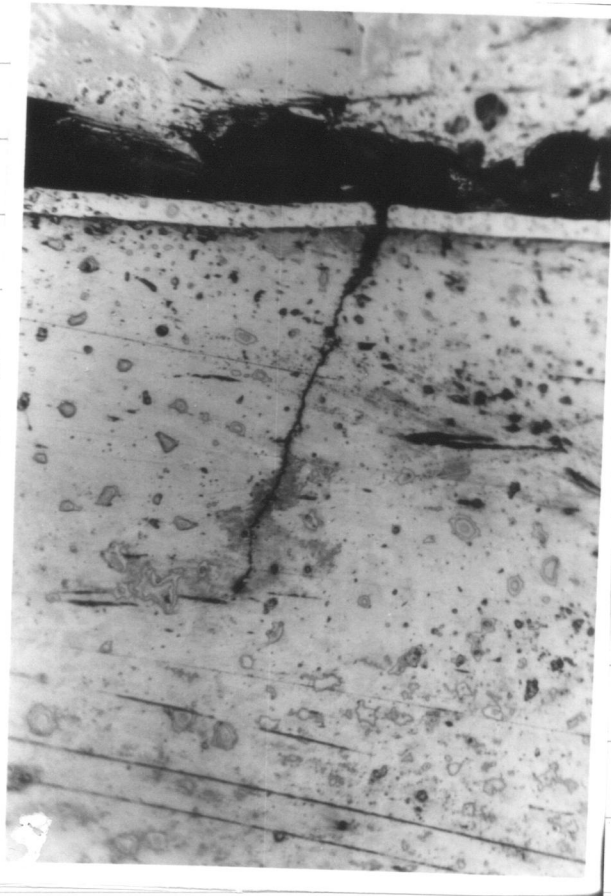


図 6-9-1 硬質めっき試験片のフレッチング疲労試験結果



ニッケルめっき皮膜
↑
鋼

図 6-9-2 繰返し応力を受け ニッケルめっき皮膜
から発生した き裂 X 600



ニッケルめっき皮膜
↑
鋼

x 300

図 6-9-3 鋼内部へ進行したき裂 (ニッケルめっき試験片)

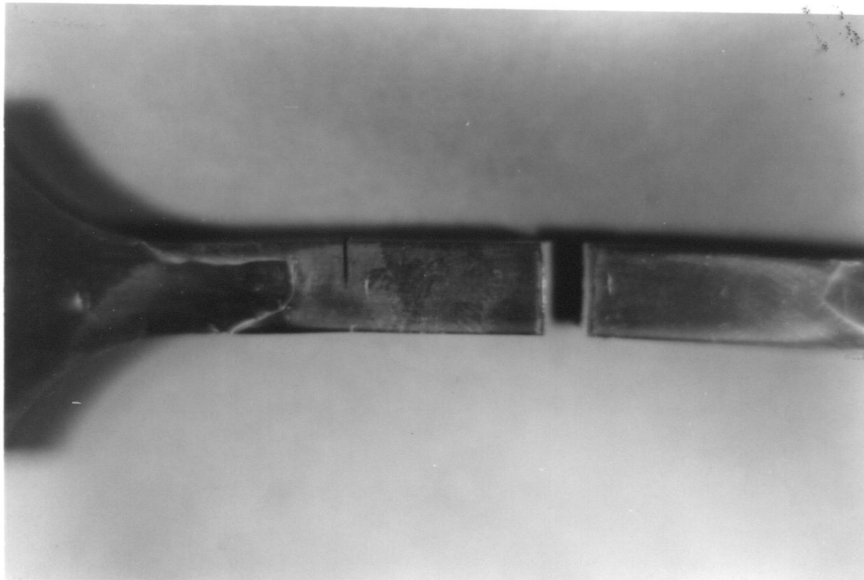


図 6-9-4 破断したニッケルめっき試験片 フレッチング部以外にも
き裂の発生が見られる。

h. クロムめっき

クロムめっき皮膜は、ニッケルめっき皮膜より硬いかニッケルめっき試験片のようにフレッチング部以外で大きなき裂を発生したり破断することはなかった。

クロムめっき皮膜のフレッチングによる損傷は非常に少なくフレッチング疲労試験結果もニッケルめっきのものより良好で、めっきを施さないものとほぼ同じであった。

図 6-9-5 は、フレッチング損傷を受けたクロムめっき試験片の断面を示すがめっき皮膜のき裂は表面に対して垂直である。これはめっき皮膜の脆性に起因するものである。

クロムめっきも引張残留応力を有するために引張応力を受けるとき裂が発生しやすい。

発生したき裂は鋼母材の中へそのまま進展することが多い。

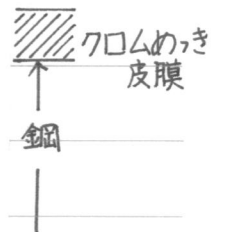
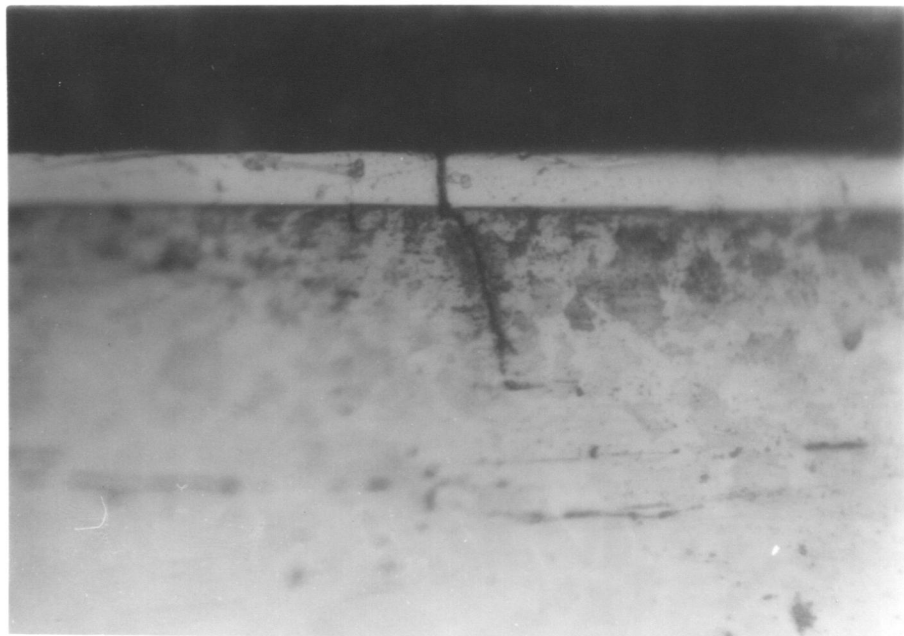


図 6-9-5 クロムめっき皮膜より発生したき裂

× 600

C. 銅めっき（硫酸銅溶液）

この銅めっき皮膜は、試験片と同じ程度の硬度を有し、フレッチング摩耗は比較的少なかった。

フレッチング疲労試験結果は硬質めっきのものの中で最も良かったが、めっき部と非めっき部との境界に深い腐食の跡があり、この部分から破断したものがあった。これは硫酸銅溶液による腐食の跡で、これが切欠きとして作用したためと思われる。（図6-9-6）

このためこのめっきに関するデータがやや少なくなっている。

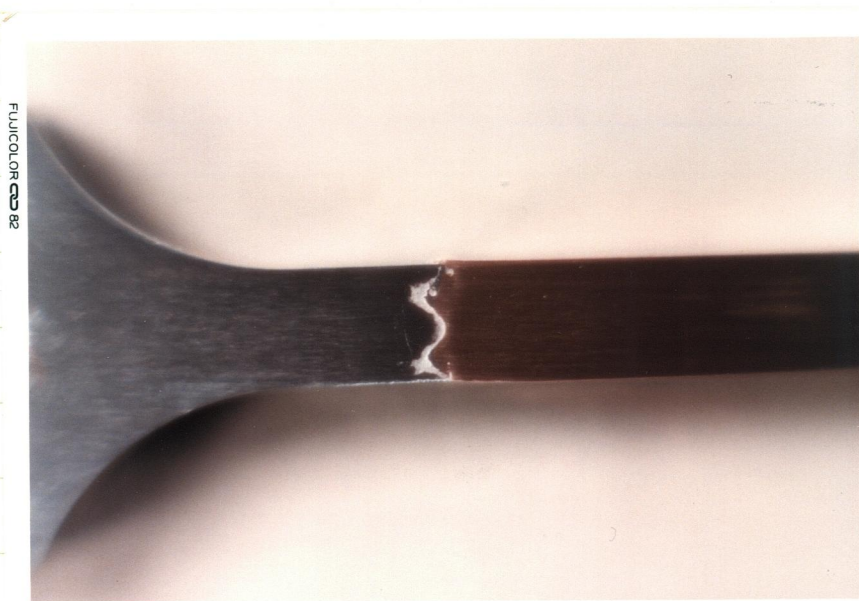


図 6-9-6

硫酸銅溶液による腐食の跡

(2) 軟質めっき

軟質めっき材としてカドミウム、銅(シアン化銅)、亜鉛、銀を選び疲労特性を調べた。

その結果を図 6-9-7 に示す。

これより一般に軟質めっきは鋼のフレッチング疲労限の改善に寄与することから分かる。

a. カドミウムめっき

カドミウムは非常に軟かく($H_V=25$) 激しいフレッチングを受けると比較的初期に剥離する。

フレッチング回数に対する摩擦力の変化を調べると約 10^4 回付近で急激に摩擦力が上昇するのが見られた。この回数で表面層に大きな変化が現われるものと思われる。

応力振幅 176 MPa (18 kg/mm^2), 接触荷重 65.3 N/mm (6.66 kg/mm) でフレッチング回数を 10^4 回 および 3.0×10^5 回与えたときの表面損傷の形状を示したのが図 6-9-8 である。

両者を比較すると損傷の差はあまり認められない。つまりカドミウムめっきは、フレッチングの初期に大部分が摩耗するが、鋼表面の薄膜は摩耗しにくく、それが保護的作用をして鋼の摩耗を低減させると考えられる。

b. 銀めっきと亜鉛めっき

銀めっきと亜鉛めっきの硬度はそれぞれ 110 H_vと 95 H_vで鋼母材と比べてかなり軟かいが、これらのフレッチング疲労試験結果は共に良好であった。

c. 銅(シアン化銅)めっき

硬度は銀および亜鉛と同程度であるが、その結果はやや異なっている。

応力振幅の大きいときは、フレッチング疲労寿命の向上は見られなかったが、小さな応力振幅のときに増加が見られた。

Waterhouse²¹⁾は鋼に銅めっき(H_v 95)を施しフレッチング疲労試験を行ないその特性を調べた。

それによれば厚さが 76~126 μm では厚さが増すにつれてフレッチング疲労限が増加したが、38 μm 厚さのときはめっきを施さないときとほとんど変わらなかった。

彼の試験は、フレッチングなしの疲労限に近い応力振幅で、はじめにフレッチングを与えその後はフレッチングを与えないで疲労試験のみを行なう二段試験法によるもので今回の試験方法とは異なる。しかし今回の銅めっき皮膜の厚さが 25 μm で応力振幅がめっきなしの疲労限[191 MPa (19.5 kg/mm²)]のときの結果と比較すると同様な

結論を得る。

軟質めっき皮膜は、接触応力の緩和、相対変位の吸収などによりフレッチングに対して有効である。また、その有効性は硬さ、凝着性を含めた金属の性質により異なるものと判断される。

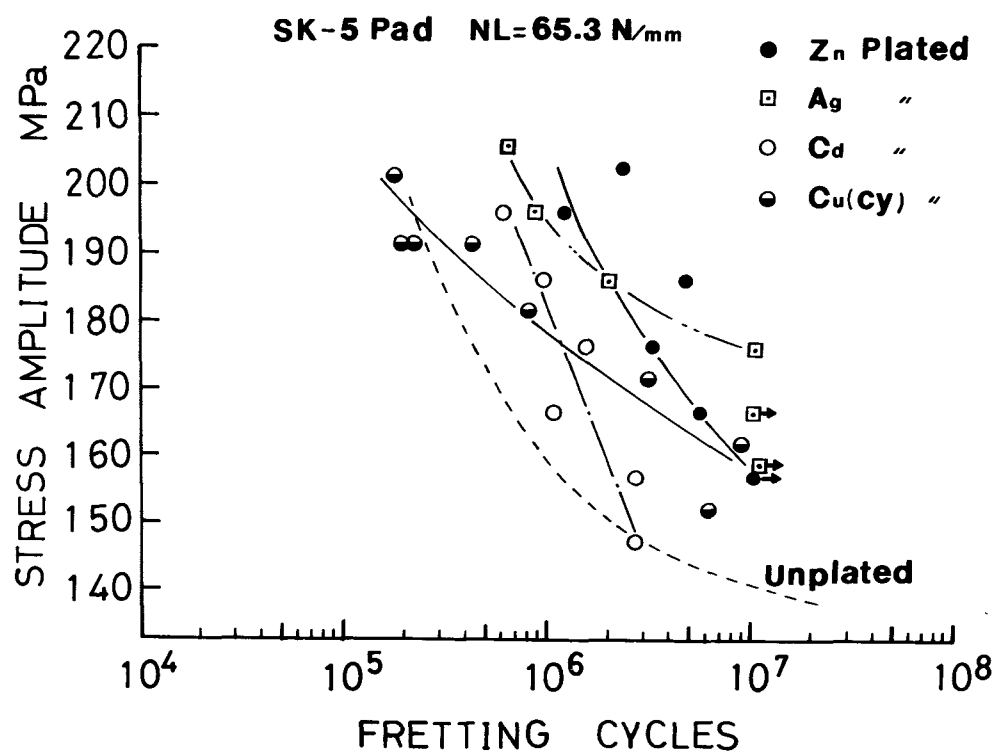
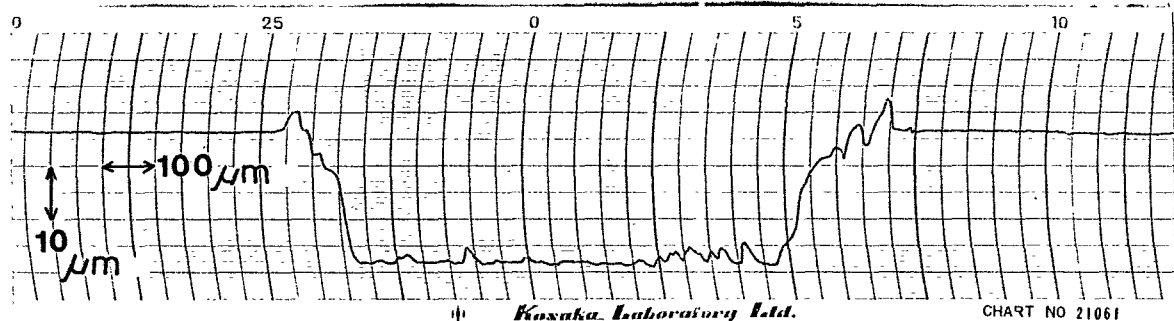
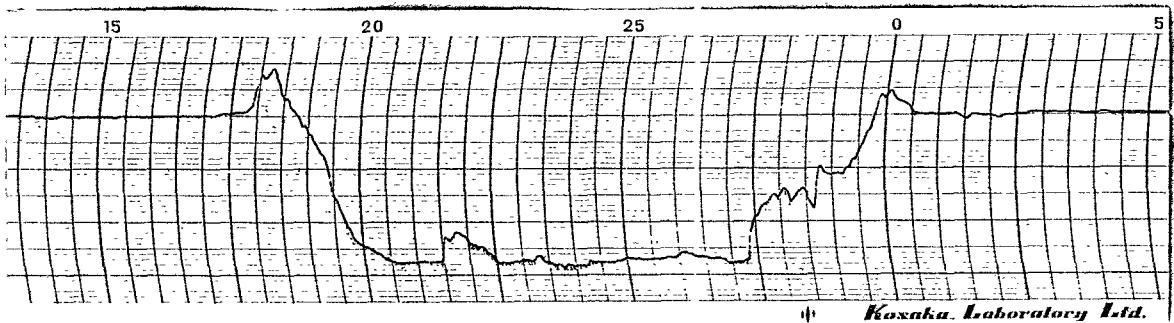


図 6-9-7 軟質めっき試験片のフレッチング疲労試験結果



$\sigma = 176 \text{ MPa}$ 1.0×10^4 Cycles



$\sigma = 176 \text{ MPa}$ 3.0×10^5 Cycles

図 6-9-8 カドミウムめっき試験片に 1.0×10^4 回と 3.0×10^5 回
フレッチングを与えたときの損傷量の比較

6-10 めっき材の摩擦係数とすべり振幅の変化

試験条件を一定〔応力振幅 176 MPa (18 kg/mm^2), 接触荷重 65.3 N/mm (6.66 kg/mm)〕にして, 3.0×10^5 回 (ニッケルは 1.5×10^5 回) フレッチングを与えたときの摩擦係数およびすべり振幅の変化をそれぞれ図6-10-1と図6-10-2に示す。

フレッチング初期は, 接触面積が小さいが, 繰返し数と共にしだいに増加し, 酸化皮膜も破壊されて金属接触する領域が大きくなる。

この初期期間を除けば, 硬質のクロムめっきとニッケルめっきのものは摩擦係数がほぼ一定で, すべり振幅も大きな値をとる。

これに対して軟質のカドミウム, 亜鉛, 銀めっきは, 硬度が低い程摩擦係数が大きく, すべり振幅は小さくなっている。

硬い材料の上に軟かい金属を付着させて摩耗挙動を調べた研究³⁰⁾によると摩擦係数は材料自体のせん断強さと関係しており, 皮膜が厚くなると荷重保持能力が低下し摩擦係数が増加するといわれている。

軟質めっきでは, 二面間の摩擦力は, すべり摩擦抵抗と皮膜の変形に要する力との和として記録さ

れる。

パッドに加わる摩擦抵抗が大きくなると板バネの变形量が大きくなり、パッドと試験片との相対変位は小さくなる。

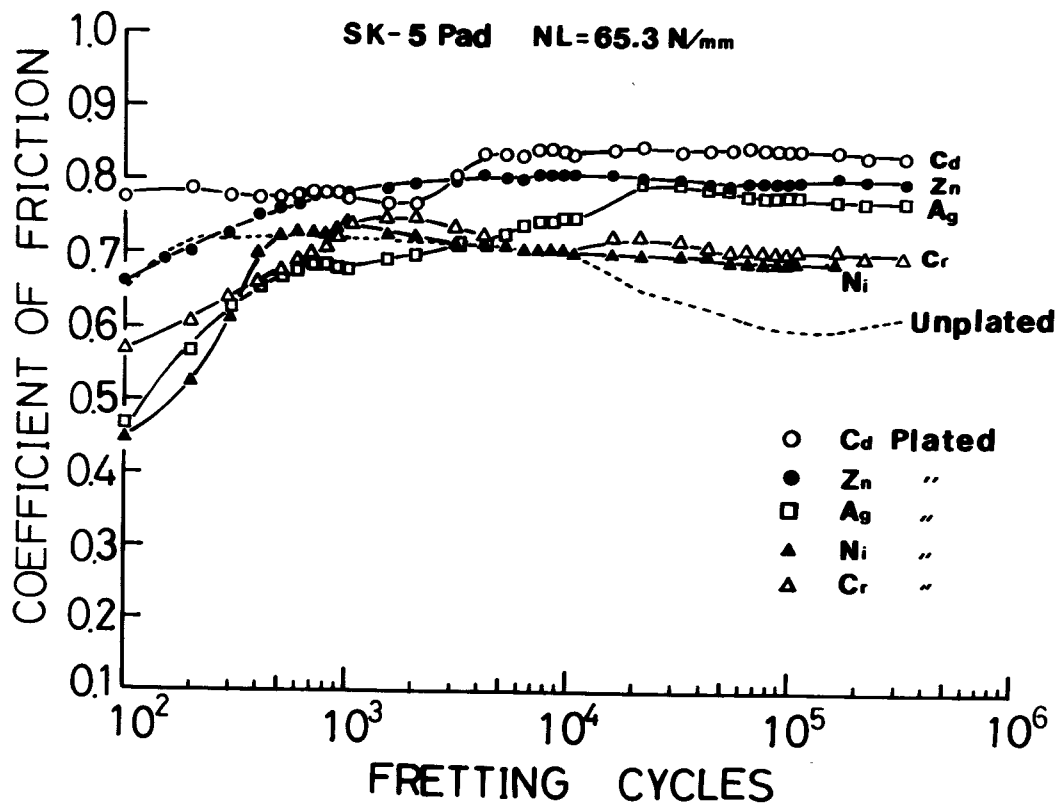


図 6-10-1 めっき材の摩擦係数の変化

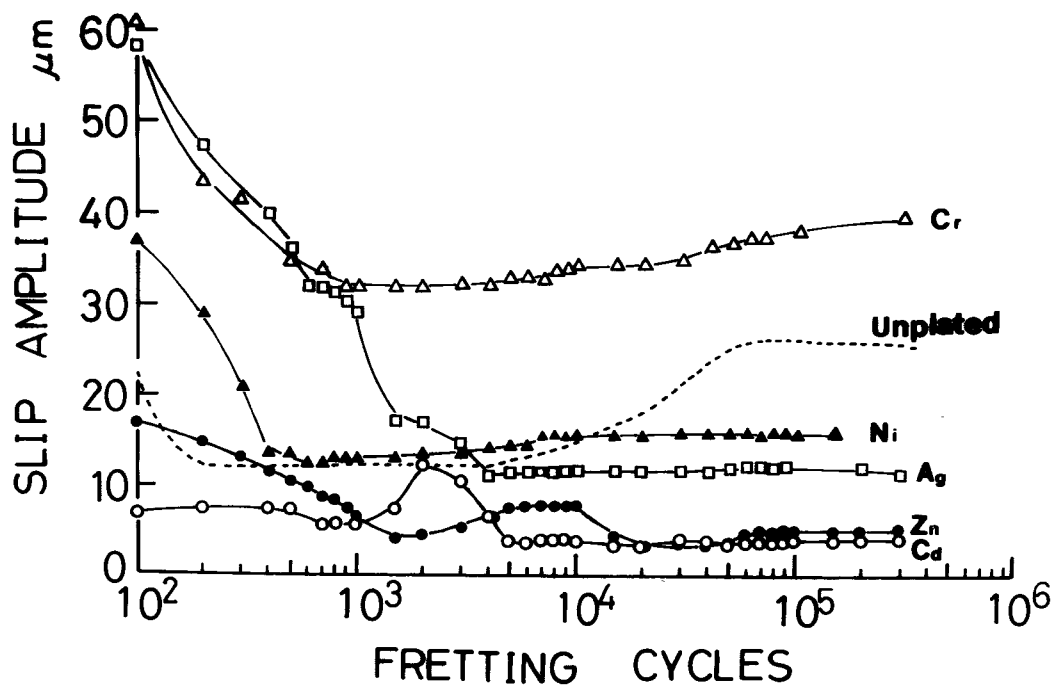


図 6-10-2 めっき材のすべり振幅の変化

6-11 めっき皮膜の損傷

一定条件〔応力振幅 176MPa (18Kg/mm), 接触荷重 65.3N/mm (6.66Kg/mm), 3.0×10^5 回 (ニッケルは 1.5×10^5 回)] のフレッチング損傷を与えた後、損傷部を粗さ計にて記録したときの結果を図6-11に示す。

硬質のニッケルめっきやクロムめっきの損傷は非常に少ない。

そのに対して、軟質めっきのものは、軟かいほど損傷が大きく、最も軟かいカドミウムめっきでは、損傷部のめっきはほとんどなくなり母材の鋼と接触している。

銀は延性に富むため損傷後もなめらかな曲線形状が保たれている。

一般的にフレッチング損傷量は、めっき皮膜の硬度と相関があり、硬度が増すにつれて損傷は少なくなる。しかし、フレッチング疲労寿命との相関は明確ではない。

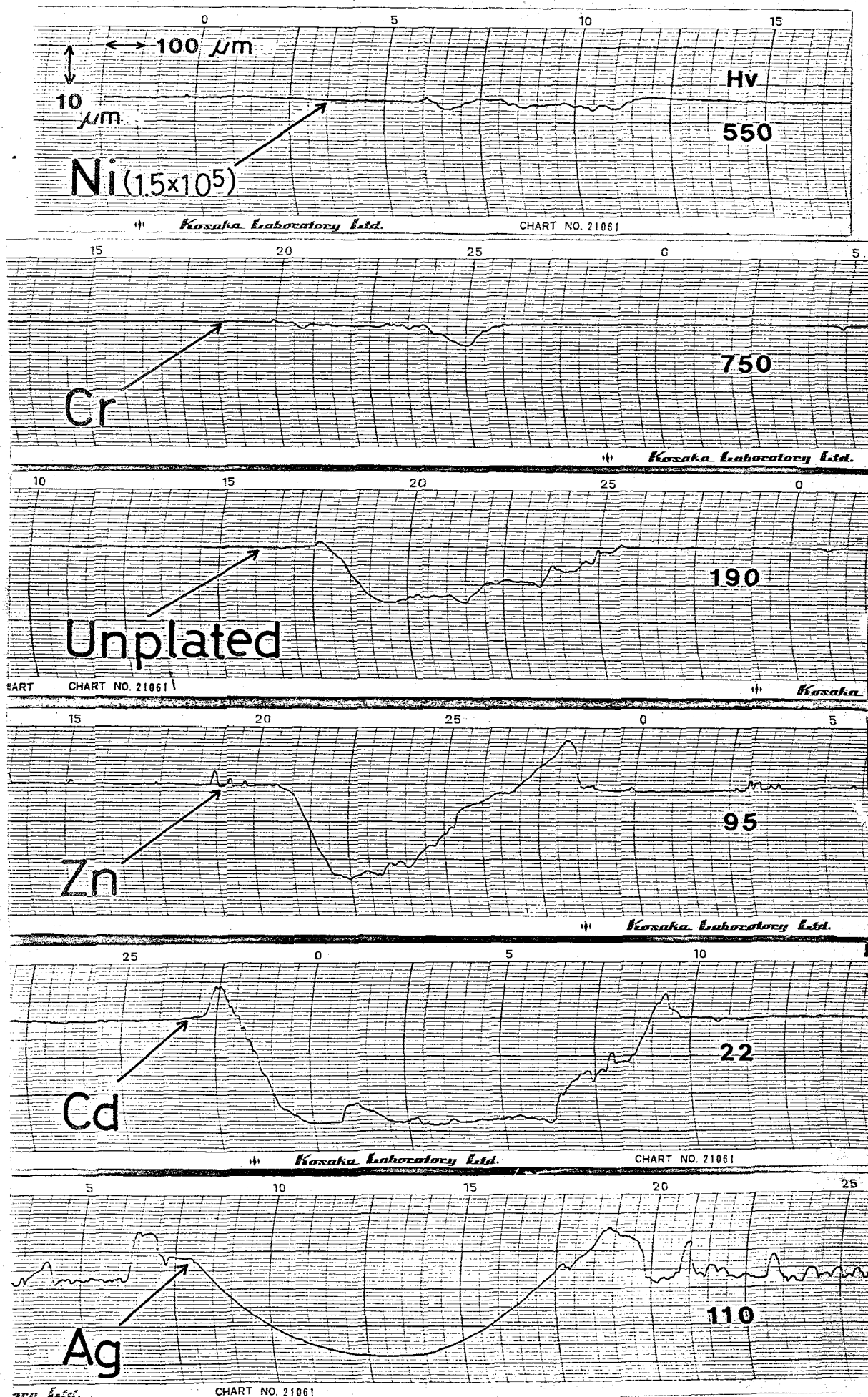


図 6-11 各種めっき試験片に一定条件のフレッチングを与えたときの損傷

6-12 各種銅めっきの影響

銅めっきには一般に硫酸銅めっきとシアン化銅めっきとがよく用いられている。

硫酸銅めっきは、光沢を有し、硬度が高いのに対して、シアン化銅めっきは鋼母材との密着性はすぐれるが硬度は低いことが知られている。

今回の研究では、硫酸銅溶液にて硬度が 210 Hv [$\text{Cu}(210)$] と 140 Hv [$\text{Cu}(140)$] になるようにめっきを行なったもの 2 種、このうち軟かい方 $\text{Cu}(140)$ を真空炉で 400°C 1 時間保持のベーキング (BAKING), ^{あぶ} 焙り焼きを施したもの [$\text{Cu}(\text{BA})$], およびシアン化銅めっき [$\text{Cu}(\text{CY})$] を施したもの、合計 4 種類の試験片を準備した。

これらの性状を表 6-1 に示す。

これらを用いてフレッチング摩耗とフレッチング疲労特性を調べた。

図 6-12-1 は、同一条件 [パッド材 SK5, 接触荷重 65.3 N/mm (6.66 kg/mm), 応力振幅 176 MPa (18 kg/mm^2)] で、 3.0×10^5 回 フレッチング損傷を与え、損傷部を表面粗さ計にて測定した結果を示す。

硬度の高いものは、損傷幅が狭いが深く、

硬度の低いものは 損傷幅 が広く 接触部の両端に盛り上がりが見られる。

Cu(BA) のものは 損傷跡がなめらかな曲線で示され 銀めっきの損傷と類似の傾向を示した。

表 6-1 各種銅めっきの性状

めっきの種類		厚さ μm	硬度 Hv	硬度試験重 gr
硫酸銅めっき	Cu (210)	30 - 45	210	25 50
	Cu (140)	40 - 50	140	10 25
	Cu (BA)		66	10 25
シアン化銅めっき Cu (CY)		25	100	10 25

Cu(BA) は Cu(140) を真空炉で 400°C 1時間保持の熱処理(Baking)を行なったもの。

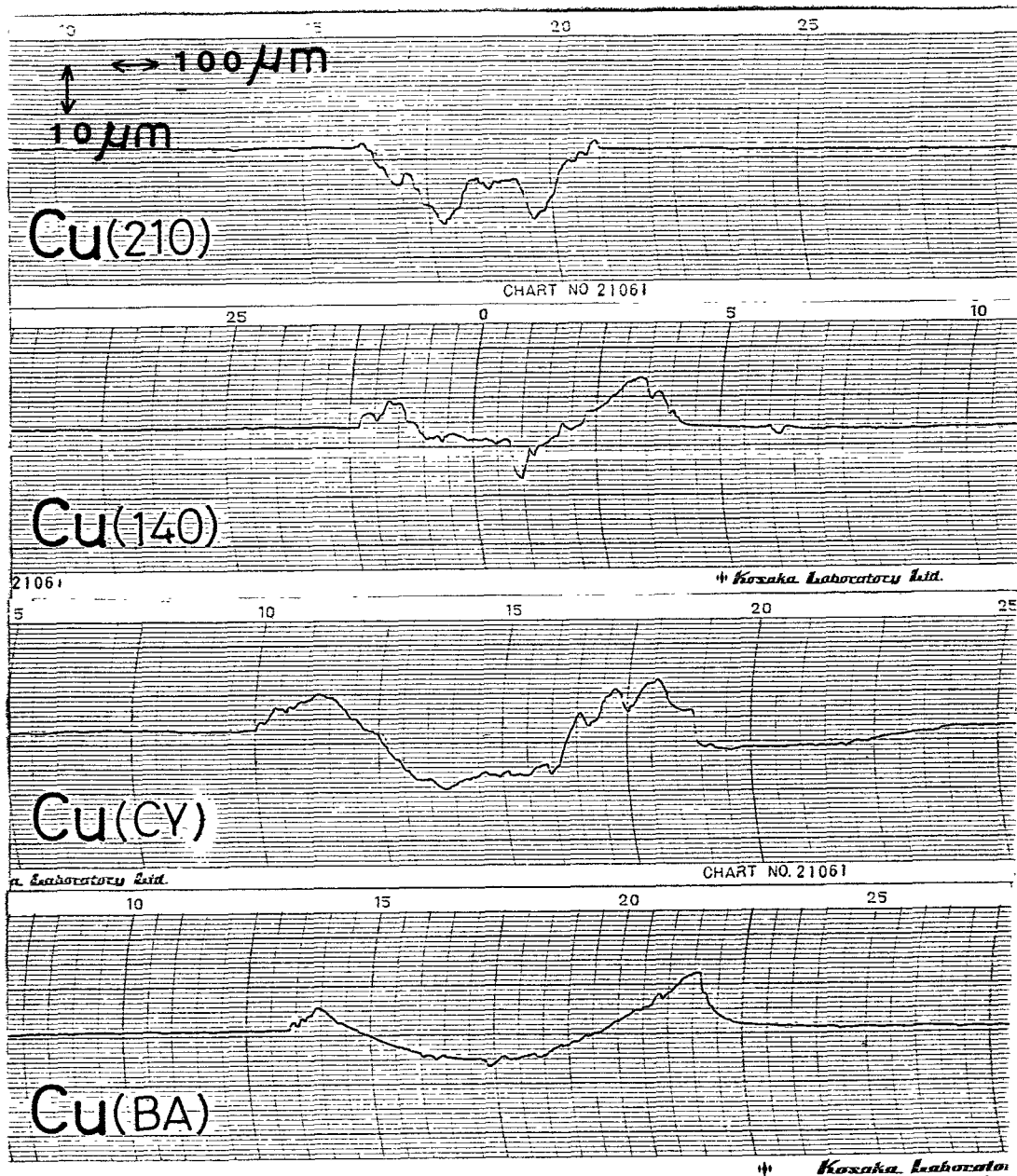


図 6-12-1 各種銅めっき試験片に同一条件のフレッチング
損傷を与えたときの 損傷部の形状

これらの試験片を用いて フレッチング疲労させたときの結果を 図 6-12-2 に示す。

なお、ベーキングにより 鋼母材のフレッチングなしの疲労限が変化することも考えられたので、めっきを施さない試験片に、ベーキングと同様な熱処理を与え、疲労特性を調べた。

その結果、この熱処理を施しても 鋼母材の疲労曲線は変化しないことが確認された。

試験結果から、どのめっきの場合も、実験点がある範囲内にはらっており、フレッチング疲労寿命とめっき層の硬度との相関を見出すことは困難である。しかし、全体として銅めっきを施すことにより、フレッチング疲労寿命が若干向上し、多少の有効性が認められる。

また、硫酸銅めっき Cu(140) のものは、ベーキングにより、実験結果のばらつきが少なくなることが認められる。

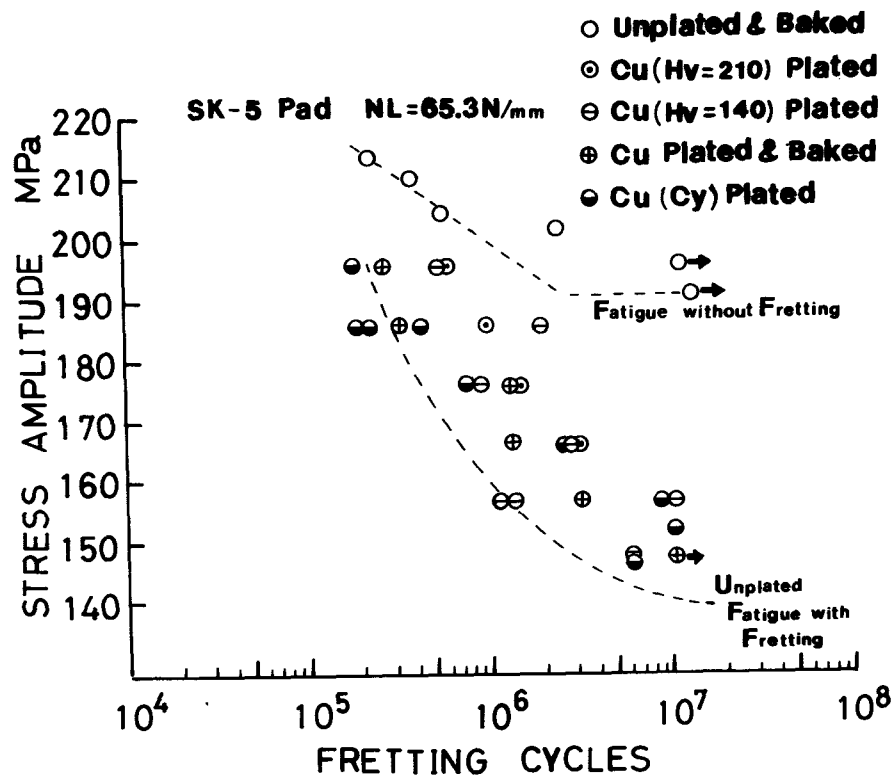


図 6-12-2 各種銅めっき試験片のフレッチング疲労試験結果

6-13 ニ層めっき

前項で各種めっきのフレッチング疲労におよぼす影響を調べ軟質めっきが効果的であることが分かった。

しかし、これらの軟質金属は損傷量が大きくアブレーションに対する耐摩耗性が懸念される。

そこでこの耐性に優れるクロムとニッケルのめっき材のフレッチング疲労強度を改善する試みとして、軟質めっきと硬質めっきとを組合わせることにした。すなわち、まず鋼表面に薄い銅めっきを施し、その上にニッケルまたはクロムめっきを行ないフレッチング特性を調べた。

その結果を図6-13-1と図6-13-2に示す。いずれの場合もニッケル、クロムそれぞれを単独でめっきしたときと比べ大幅に寿命が延びている。

図6-13-3は、(銅+クロム)めっき試験片のフレッチング部の断面を示す。

クロムめっき皮膜で発生したき裂は、銅めっき部で停止していることが認められる。

また試験片が塑性変形して、クロムめっき皮膜のき裂が大きくなっても、銅めっき皮膜は延性に富み鋼表面を保護することが分る。(図6-13-4)

高サイクルの激しいフレッチング損傷を受けると

クロムめっき皮膜は、部分的に剥離するが、残ったクロムめっき皮膜が有効に作用し、銅めっき皮膜の保護作用と相まって疲労寿命の向上に寄与すると考えられる。(図6-13-5)

次にクロムめっきのみ施したときと(銅+クロム)めっきを施したときの摩擦係数を比較したのが図6-13-6である。両者はほぼ同一の挙動を示し、摩擦が最表面の材料クロムで決まることを意味している。

以上のように、銅とクロムまたはニッケルを重ねてめっきすることにより、クロムやニッケルの耐摩耗性を余り失うことなく、フレッチング疲労強度を高めることができた。

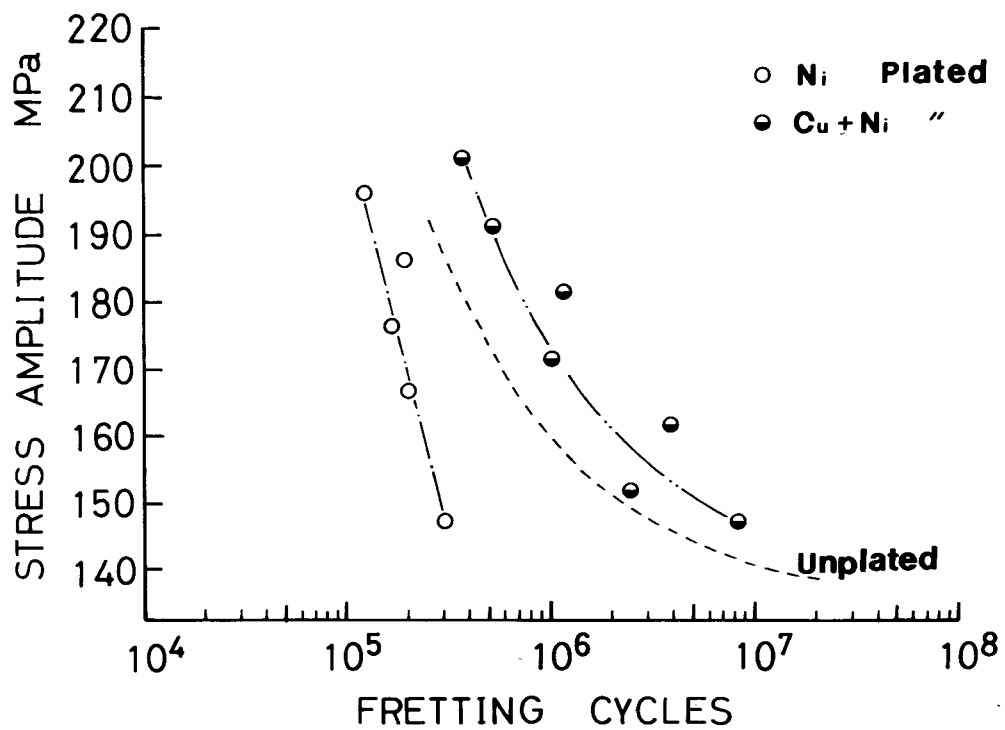


図 6-13-1 ニッケルめっき試験片と(銅+ニッケルめっき試験片の
フレッチング疲労試験結果

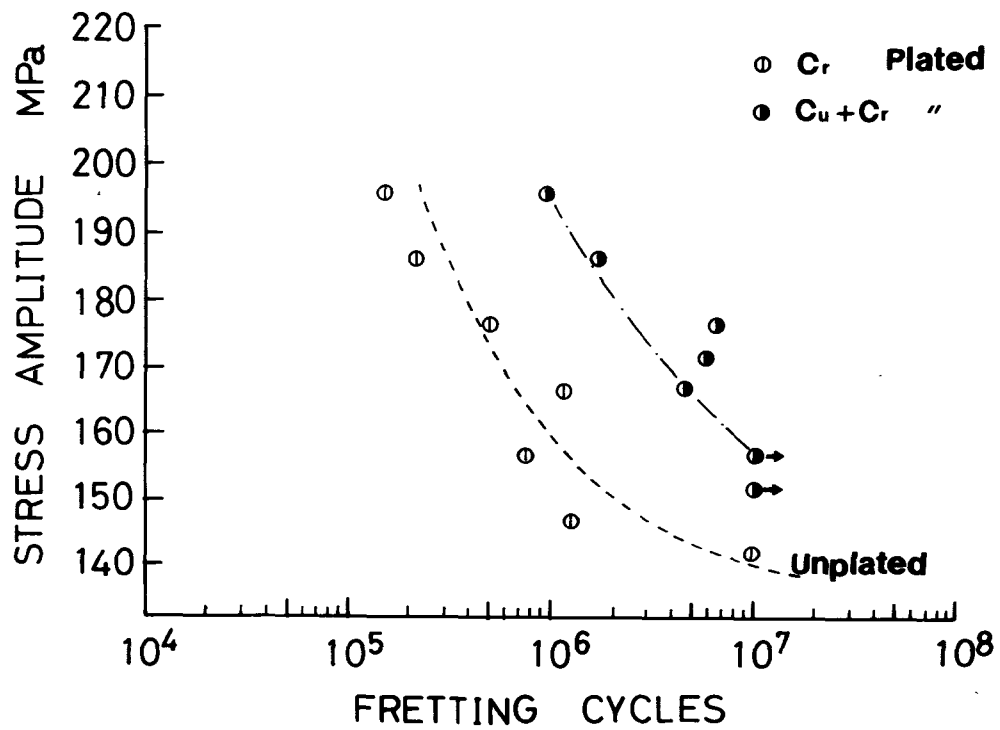


図 6-13-2 クロムめっき試験片と(銅+クロムめっき試験片の
フレッチング疲労試験結果

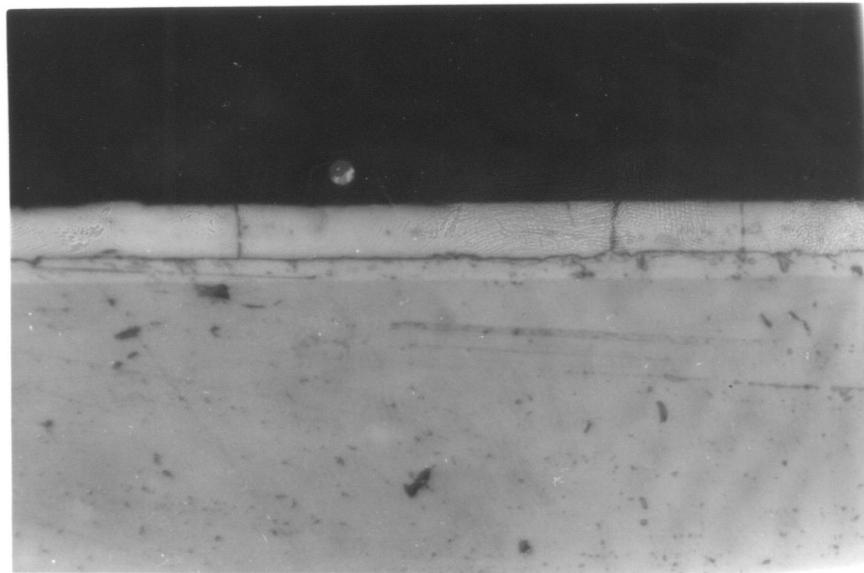
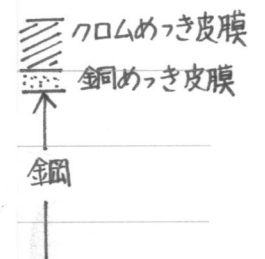
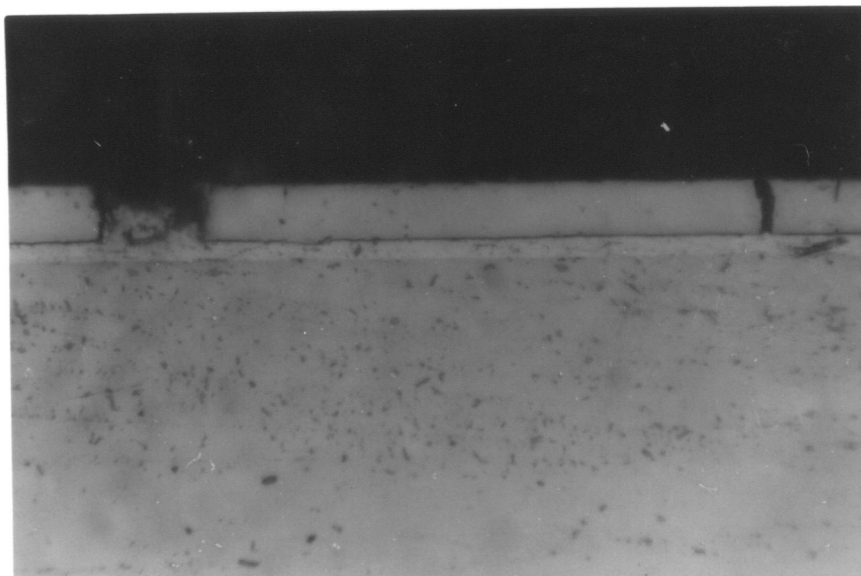
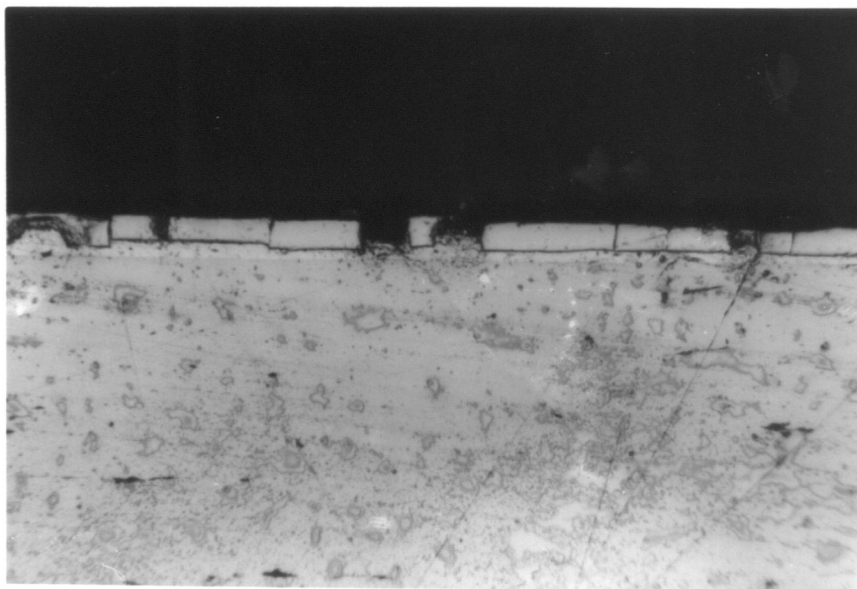


図 6-13-3 フレッチングによりクロムめっき皮膜から発生した
き裂が銅めっき部で停止した状態 × 600



× 600

図 6-13-4 試験片が塑性変形し クロムめっき皮膜のき裂が
大きくなっても 銅めっき部で止まっている様子を示す。



クロムめっき皮膜
銅めっき皮膜
↑
鋼

図 6-13-5 激しいフレッチング損傷を受けた 銅+クロムめっき試験片
X150

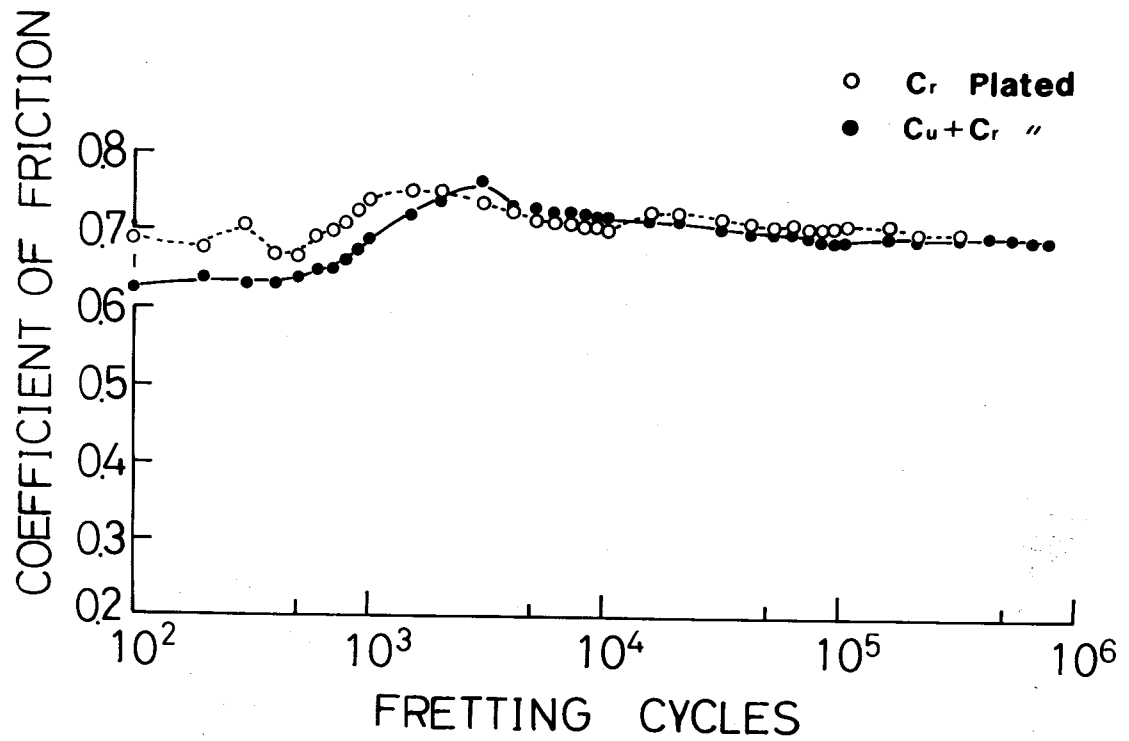


図 6-13-6 クロムめっき試験片と銅+クロムめっき試験片の摩擦係数の比較

7 章 結 論

S45C 鋼 に 変動引張荷重とフレッチング損傷とを同時に与え、パッドの材質や垂直荷重の影響を調べ、めっきの効果について調べた。

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

1) フレッチングを伴う変動引張荷重下での疲労は、平滑材(フレッチングを伴わないとき)と比べて疲労強度の低下が著しい。

この低下の割合は、応力振幅が小さいときに大きい。

2) S45C 鋼のフレッチング疲労寿命は、

パッド材に S45C を使用すると接触荷重の影響を大きく受け、接触荷重が低いときは寿命が長く、高いときは短い。

これに対して、パッド材に硬い SK5 を使用すると接触荷重の影響がほとんど認められず、いずれも短い値を示した。

これは主としてパッド材の耐摩耗性の差異によるもので、摩耗しやすい材料では接触圧力の低下が著しいためと考えられる。

- 3) 接触荷重を変化させるとフレッチング摩耗量も変化するが、摩耗量とフレッチング疲労寿命との間に明白な相関は見られなかった。
摩耗量が特に多いときは、フレッチング疲労寿命が増大する例が認められた。
- 4) 繰返し応力の速度が変化するとフレッチング初期の摩擦係数に変化が見られるが、定常状態に達するとその差は認められなかった。
- 5) 変動引張荷重下でのフレッチング疲労において、接触荷重が一定のときは、試験片厚さが2mmのものと4mmのものとは、疲労寿命にほとんど差が見られなかった。
- 6) ワット液を用いた高硬度のニッケルめっきは、フレッチング疲労に対して逆の効果、すなわち寿命を低下させる現象が認められた。
- 7) 銀、亜鉛、カドミウムおよび銅めっきはフレッチング疲労寿命に対して有効性が認められた。

8) 硬度の異なる銅めっきを試験片に施し
フレッチング疲労寿命を比べた結果、硬度と
フレッチング疲労寿命との相関は認め
られなかった。

9) ニッケルまたはクロムめっきの下地に
銅めっきを施して二層とするとフレッチング
疲労寿命の向上が図れることが判明した。

あ と が き

従来 フレッチング疲労に関する研究は、曲げ応力 もしくは ねじり応力 についてのものが多く、変動引張荷重に関する報告は少い。

今回の研究では、S45C 鋼 が変動引張荷重を受けたときの フレッチング疲労特性を調べたが、その結果は従来 の 曲げ応力 および ねじり応力 を受けたときの結果と定性的に一致することが分かった。

めっきの影響については、硬質めっき および 軟質めっき について調べた結果 軟質めっきが フレッチング疲労に対して良好であることが分かった。硬質めっきについては、今回の実験では望ましい効果は得られなかったが、最近の研究によれば、スルファミン酸 溶液の ニッケルめっきを用いて フレッチング疲労寿命を向上させた例もある。

めっき膜の性質は、めっき条件 つまり電流密度、電解液の成分 および 温度 等により大きく変化することが知られているが、今回のめっき加工は外部に依頼したため詳細なめっき条件が把握できず、従来 の 研究との比較ができなかった。

軟質めっきと硬質めっきとを組合せた

二層めっきのときに良好な結果が得られたが、今後の課題としてそれぞれのめっき層がどの厚さのときに最大の効果が得られるか調べる必要がある。

また、今回はめっき法により金属皮膜を与えたが、最近注目されているイオンプレーティング、スパッタリングなどの方法で金属皮膜を与えそのフレッチング疲労特性を調べるのも興味深い。

最後に 本論文の作成にあたり終始御指導いただいた本学 佐藤 準一 教授をはじめ 志摩 政幸 助教授、古口 日出男 助手、山尾 元春 技官、試験装置の作成にあたり多大なる御協力をいただいた オイレス工業の 林 洋一郎 氏、また 実験に協力していただいた 長谷川 司 君、宮崎 基次 君に深い感謝の意を表します。

文献

- 1) 西岡邦夫, 平川賢爾 : 機械の研究, 22, 11 (1970) 1413
- 2) 西岡邦夫, 平川賢爾 : 日本機械学会論文集, 34, 263 (1968) 1183
- 3) FIELD, J.E, and WATERS, D.M. (1967) N.E.L. Rep. No. 275
- 4) 西岡邦夫, 平川賢爾 : 日本機械学会論文集, 37, 298 (1971) 1051
- 5) R. B. WATERHOUSE : Fretting Corrosion, Pergamon Press, Oxford (1972)
- 6) 西岡邦夫, 平川賢爾 : 日本機械学会論文集, 34, 266 (1968) 1644
- 7) 石橋 正 : 金属の疲労と破壊の防止, 養賢堂 (1967)
- 8) R.B. WATERHOUSE and D.A. SAUNDERS : Wear, 53 (1979) 381
- 9) H.W. LIU, H.T. CORTEN and G.M. SINCLAIR : Proc. ASTM 57 (1957) 634
- 10) SACHS, G. and STEFAN : Trans. Am. Soc. Met. 29 (1941) 373
- 11) I.M. FENG and H.H. ULIGH : J. Appl. Mech., 21 (1954) 397
- 12) K. NISHIOKA and K. HIRAKAWA : Proc. Kyoto ICM (1971) 308

13) C. POON and D.W. HOEPPNER : *Wear*, 52 (1979) 175

14) K. ENDO and GOTO : *Wear*, 48 (1978) 347

15) 遠藤吉郎, 後藤穂積 : 日本機械学会論文集, 35, 271 (1969) 498

16) 西岡邦夫, 平川賢爾 : 潤滑 15, 2 (1970) 80

17) 西岡邦夫, 平川賢爾 : 機械の研究 22, 12 (1970) 1655

18) J.E. BOWERS, N.J. FINCH and A.R. GOREHAM : *Proc. Inst. Mech. Eng. London* (1967) 703

19) 友野理平 : 実用めっきマニュアル, オーム社 (1971)

20) G.M.C. LEE and W.J.D. JONES : *Trans. Inst. Metal. Fini.* VOL 54 (1976) 197

21) R.B. WATERHOUSE, P.A. BROOK and G.M.C. LEE : *Wear*, 5 (1962) 235

22) G.M.C. LEE and W.J.D. JONES : *Wear*, 68 (1981) 71

23) J.E. STARECK, E.J. SEYB and A.C. TULUMELLO : *Proc. Amer. Electroplaters' Soc* (1965) 129

24) MAJ-BRITT, K. GABEL and JAMES I. BETHKE : *Wear*, 46 (1978) 81

25) WALTER BECK : *ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGY*, Mar-Apr (1964) 74

26) J.O.SMITH and C.K.LIU : J. Appl. Mech, 20 (1953) 175

27) K.L.JONSON and J.J.O'connor : Proc. Inst. Mech. Engrs 15 (1963) 178

28) S.VAN DER ZWAAG and J.E.FIELD : Philosophical Magazine 46 (1982) 133

29) R.A.F.HAMMOND and WILLIAMS : Met. Rev. J. Inst. Metals (1960) 165

30) M.A.SHERBINEY and J.HALLING : Wear, 45 (1977) 211

31) 菊川真, 大内田久, 岩元兼敏 : 日本機械学会誌, 72, 608, (1969) 1189